

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD LONGITUDINAL  
Y PENDIENTE DE CALZADA A TRAVÉS DE  
UN FILTRO KALMAN EN VEHÍCULOS

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Mecánica  
Septiembre 2016

Autor: Philipp Klein Herrero

Tutor: Javier García Guzmán



# Agradecimientos

Me gustaría emplear este espacio para compartir el agradecimiento que siento al entregar esta memoria.

En primer lugar, me gustaría mostrar mi agradecimiento al tutor de este proyecto, Javier García Guzmán por brindarme la oportunidad de realizar un proyecto interesante e innovador. Su conocimiento y visión me han guiado desde el principio del proyecto y han permitido estructurar esta memoria de manera coherente y útil. En plano personal, agradezco su trato amable y su motivación para ayudar en todo caso al alumno.

En siguiente lugar, me gustaría agradecer a María Jesús y Beatriz López Boada por su apoyo en este trabajo. Sin su ayuda, tanto en el plano teórico como en el práctico, este proyecto no habría dado sus frutos. Agradezco el trato siempre atento y el esfuerzo en ofrecerme soluciones a los problemas que han podido surgir durante el experimento.

La realización del proyecto ha envuelto la ayuda y participación de varios departamentos de la Universidad Carlos III de Madrid. Este trabajo representa una pequeña parte de la colaboración existente entre los departamentos de ingeniería mecánica e informática, indicador del buen clima existente en la universidad.

En conclusión, agradezco a la Universidad Carlos III y a todo su profesorado la oportunidad que me han brindado y el apoyo que me ha servido de base para llegar hasta el punto en el que me encuentro.

# Índice general

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>12</b>
Índice Capítulo 1	13
1. Introducción	14
1.1 Problema a resolver (Área)	15
1.2 Motivación	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Método de trabajo	17
1.5 Contenido	20
 <b>Capítulo 2. Estado de la cuestión</b>	 <b>21</b>
Índice Capítulo 2	22
2. Estado de la cuestión	23
2.1 Investigación previa	23
2.2 Sistemas Bus y relación entre CAN Bus y OBD II	25
2.3 CAN Bus	26
2.3.1 Aplicaciones CAN Bus	28
2.3.2 Arquitectura CAN Bus	28
2.3.3 Transmisión de datos en CAN Bus	30
2.3.4 Asignación de IDs de CAN Bus	30
2.3.5 Capas de CAN Bus	30
2.4 OBD II	31
2.4.1 Interfaces de OBD II	32
2.4.2 Protocolos OBD II	34
2.4.3 Datos disponibles a través de OBD II	35
2.4.4 Aplicaciones OBD	35
2.4.5 Problemas de seguridad en OBD II	36
2.4.6 Ubicación del conector OBD II	37
2.5 Filtro Kalman	37
 <b>Capítulo 3. Aproximación experimental</b>	 <b>40</b>
Índice Capítulo 3	41
3. Aproximación experimental	42
3.1 Objetivos	42
3.2 Registro de datos	43
3.2.1 Datos requeridos	43
3.2.2 Instrumentos de medida	44
3.2.2.1 Hardware utilizado	44
3.2.2.2 Software utilizado	46
3.2.3 Adquisición de datos	48
3.2.4 Condiciones de adquisición de datos	49

3.2.5	Alternativas y argumentos	50
3.2.6	Análisis de los datos	52
3.3	Ensayos para el registro de datos	55
3.3.1	Vehículo de pruebas	55
3.3.1.1	Radio efectivo del Hyundai i30	57
3.3.1.2	Información OBD II del Hyundai i30	59
3.3.2	Ensayos requeridos	60
3.3.2.1	Ensayos en superficie plana	61
3.3.2.2	Ensayos en pendiente	62
<b>Capítulo 4. Resultados</b>		<b>64</b>
Índice Capítulo 4		65
4.	Resultados	66
4.1	Estimador inicial	66
4.1.1	Ecuaciones y modelo iniciales	67
4.1.1.1	Estimación de velocidad longitudinal a partir de velocidad de ruedas	67
4.1.1.2	Estimación de pendiente de calzada a partir de velocidad de ruedas	69
4.1.2	Resultados del modelo inicial	71
4.2	Estimador final	72
4.2.1	Ecuaciones y modelo finales	73
4.2.2	Simplificaciones del modelo final	75
4.3	Resultados de los ensayos	76
4.3.1	Ensayos en superficie plana	77
4.3.1.1	Ensayo en llano 1	77
4.3.1.2	Ensayo en llano 2	78
4.3.1.3	Ensayo en llano 3	79
4.3.1.4	Ensayo en llano 4	80
4.3.1.5	Ensayo en llano 5	81
4.3.1.6	Ensayo en llano 6	82
4.3.1.7	Resumen de los ensayos en llano	83
4.3.2	Ensayos en plano inclinado	84
4.3.2.1	Ensayo en rampa 1	84
4.3.2.2	Ensayo en rampa 2	85
4.3.2.3	Ensayo en rampa 3	86
4.3.2.4	Ensayo en rampa 4	87
4.3.2.5	Ensayo en rampa 5	88
4.3.2.6	Ensayo en rampa 6	89
4.3.2.7	Resumen de los ensayos en rampa	90
<b>Capítulo 5. Discusión</b>		<b>91</b>
Índice Capítulo 5		92
5.	Discusión	93
5.1	Limitaciones de los resultados	94
5.1.1	Limitaciones por definición del experimento	95

5.1.2 Limitaciones por contexto	95
5.2 Generalización de los resultados	96
<b>Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b>	<b>97</b>
Índice Capítulo 6	98
6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo	99
6.1 Objetivos conseguidos	99
6.2 Aprendizaje	100
6.3 Futuros trabajos	101
6.4 Conclusiones	103
<b>Capítulo 7. Anexo: Plan de trabajo y presupuesto</b>	<b>104</b>
Índice Capítulo 7	105
7. Anexo: Plan de trabajo y presupuesto	106
7.1 Plan de trabajo	106
7.2 Presupuesto	112
7.2.1 Costes de hardware	112
7.2.2 Costes de software	114
7.2.3 Costes de mano de obra	114
7.2.4 Costes totales de ejecución material	115
7.2.5 Gastos generales y beneficio de industria	116
7.2.6 Presupuesto de ejecución por contrata	116
7.2.7 Importe total del presupuesto	117
<b>Capítulo 8. Bibliografía</b>	<b>118</b>

# Listado de figuras

<b>Capítulo 1. Introducción</b>	<b>12</b>
<b>Capítulo 2. Estado de la cuestión</b>	<b>21</b>
Figura 1 Relación entre CAN Bus y OBD II	26
Figura 2 Ejemplo de cableado pre-CAN Bus y post-CAN Bus	27
Figura 3 Esquema de CAN Bus lineal de alta velocidad	29
Figura 4 Ejemplo de un conector OBD II en un Hyundai i30	31
Figura 5 Conector OBD II tipo A	33
Figura 6 Conector OBD II tipo B	33
Figura 7 Posibles Pin-outs de OBD II	33
Figura 8 Ubicación del puerto OBD II en un Hyundai i30	37
<b>Capítulo 3. Aproximación experimental</b>	<b>40</b>
Figura 9 Plano del algoritmo diseñado	42
Figura 10 Adaptador CAN-USB Lawicel	45
Figura 11 Maletín con algunos de los componentes de Racelogic	46
Figura 12 Captura de pantalla del software VBOX, una vez configurado	47
Figura 13 Disposición de componentes utilizados para los ensayos	49
Figura 14 Método de análisis	54
Figura 15 Vista tres-cuartos frontal del vehículo de pruebas	56
Figura 16 Otras vistas del Hyundai i30 utilizado para la realización del experimento	56
Figura 17 Dimensiones del Hyundai i30	58
Figura 18 Pista de pruebas en llano	62
Figura 19 Pista de pruebas en superficie inclinada	63
Figura 20 Vistas alternativas de la rampa de acceso que se ha utilizado para las pruebas en superficie inclinada	63
<b>Capítulo 4. Resultados</b>	<b>64</b>
Figura 21 Simulaciones bajo distintas matrices de covarianza propuestas por Yunlong Gao [2]	68
Figura 22 Descomposición de fuerzas sobre el centro de gravedad de un vehículo en pendiente	69
Figura 23 Estimación de velocidad y pendiente en un ensayo en llano según el modelo de Yunlong Gao	71
Figura 24 Estimación de velocidad y pendiente en un ensayo en rampa según el modelo de Yunlong Gao	72
Figura 25 Descomposición de fuerzas en pendiente del modelo final	73
Figura 26 Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 1	77
Figura 27 Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 1	77
Figura 28 Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 2	78
Figura 29 Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 2	78
Figura 30 Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 3	79

Figura 31	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 3	79
Figura 32	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 4	80
Figura 33	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 4	81
Figura 34	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 5	81
Figura 35	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 5	82
Figura 36	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 6	82
Figura 37	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 6	83
Figura 38	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 1	84
Figura 39	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 1	85
Figura 40	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 2	85
Figura 41	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 2	86
Figura 42	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 3	86
Figura 43	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 3	87
Figura 44	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 4	87
Figura 45	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 4	88
Figura 46	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 5	88
Figura 47	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 5	89
Figura 48	Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 6	89
Figura 49	Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 6	90
<b>Capítulo 5. Discusión</b>		<b>91</b>
<b>Capítulo 6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b>		<b>97</b>
<b>Capítulo 7. Anexo: Plan de trabajo completo y presupuesto</b>		<b>104</b>
Figura 50	Plan de trabajo	109
Figura 51	Desglose del plan de trabajo de ingeniería	110
Figura 52	Desglose del proceso de ingeniería simplificado	111



# Listado de tablas

Capítulo 1. <b>Introducción</b>	<b>12</b>
Capítulo 2. <b>Estado de la cuestión</b>	<b>21</b>
Tabla 1 Muestra de los posibles Pin-outs de OBD II	34
Tabla 2 Visión esquemática del funcionamiento del filtro Kalman	39
Capítulo 3. <b>Aproximación experimental</b>	<b>40</b>
Tabla 3 Ficha técnica reducida del Hyundai i30	56
Tabla 4 Información obtenida a partir del puerto OBD II del Hyundai i30	59
Capítulo 4. <b>Resultados</b>	<b>64</b>
Capítulo 5. <b>Discusión</b>	<b>91</b>
Capítulo 6. <b>Conclusiones y futuras líneas de trabajo</b>	<b>97</b>
Capítulo 7. <b>Anexo: Plan de trabajo completo y presupuesto</b>	<b>104</b>
Tabla 5 Costes de hardware comprado	112
Tabla 6 Costes de hardware amortizado o alquilado	113
Tabla 7 Costes de hardware completo	113
Tabla 8 Costes de software	114
Tabla 9 Costes de mano de obra	115
Tabla 10 Costes totales de ejecución material	115
Tabla 11 Gastos generales	115
Tabla 12 Beneficio industrial	116
Tabla 13 Gastos generales y beneficio industrial combinados	116
Tabla 14 Presupuesto de ejecución por contrata	117
Tabla 15 Importe total del presupuesto	117

# Nomenclatura

$x_k$	Matriz de variables de estado a estimar
$y_k$	Matriz de observación
$A$	Matriz de sistema
$B$	Matriz de entrada
$C$	Matriz de relación
$u$	Matriz de control
$w_k$	Ruido blanco de valor promedio igual a cero y covarianza $Q_k$
$v_k$	Ruido blanco de valor promedio igual a cero y covariza $R_k$
$Q_k$	Matriz de error de covarianza del sistema
$R_k$	Matriz de error de covarianza de la medición
$N$	Distribución Gaussiana o normal
$\hat{x}_{k k}$	Resultado de la estimación en el paso k
$P_{k k}$	Matriz de estimación de covarianza del error
$K_k$	Matriz de ganancia Kalman
$I$	Matriz identidad
$v_{di}$	Velocidad de rueda delantera izquierda
$v_{dd}$	Velocidad de rueda delantera derecha
$v_{ti}$	Velocidad de rueda trasera izquierda
$v_{td}$	Velocidad de rueda trasera derecha
$a_x$	Aceleración longitudinal del vehículo
$\dot{x}$	Derivada de la ecuación de estado
$\tau$	Tasa de muestreo
$a_{x,m}$	Medida del acelerómetro
$g$	Gravedad estándar (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$sen$	Seno
$\alpha$	Ángulo de pendiente de calzada
$\dot{v}$	Derivada de la velocidad
$\Delta$	Incremento
$m$	Metros
$s$	Segundos
$h$	Horas
$\omega$	Velocidad angular
$r_e$	Radio efectivo
$r_n$	Radio nominal
$\varepsilon$	Deslizamiento longitudinal
$g_x$	Componente longitudinal de aceleración y gravedad en pendiente
$arcsen$	Arcoseno



## Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN

# Índice Capítulo 1

## Introducción

1. Introducción	14
1.1 Problema a Resolver (Área)	15
1.2 Motivación	16
1.3 Objetivos	16
1.3.1 Objetivos generales	16
1.3.2 Objetivos específicos	17
1.4 Método de trabajo	17
1.5 Contenido	20

# 1. Introducción

Los vehículos que conducimos a diario tanto para uso personal como transporte profesional son máquinas cada vez más sofisticadas, eficientes y elaboradas. Complejos sistemas de sensores, partes móviles y elementos de seguridad componen, entre muchos otros, nuestros vehículos. Desde el inicio del desarrollo del automóvil cada iteración de diseño y desarrollo ha buscado progresar de manera que conducir sea más fácil, más eficiente y, sobre todo, más segura.

La necesidad de eficiencia y seguridad en la conducción siempre ha estado presente; llegar más lejos con menor gasto tiene implicaciones obvias tanto a nivel de consumo personal como para poderosas flotas de transporte, así como para poder garantizar viajes con menor siniestralidad. Durante los últimos años se han encontrado numerosas maneras de desarrollar productos más ahorradores y seguros, siendo una de ellas la integración de sistemas que permiten realizar análisis en tiempo de real de las condiciones de la carretera, vehículo, conductor, etc.

Existen sistemas que modifican numerosos parámetros del automóvil a partir de los datos de cámaras posicionadas en el exterior del vehículo, de radares, del sistema de navegación, del modo de conducción seleccionado o de la conducción realizada. El análisis en tiempo real de estos sistemas permite ahorrar y ofrece una conducción más segura, sin embargo implica incluir costosos componentes y desarrollar subsistemas para cada sensor añadido.

Este trabajo busca ofrecer una solución eficiente, robusta y efectiva de estimar parámetros de condiciones de la carretera utilizando los sensores ya instalados de serie en la mayoría de vehículos.

En el estudio de dinámica del vehículo, se consideran multitud de aspectos que influyen notablemente en el comportamiento del automóvil. Sin embargo, para realizar mediciones de un vehículo en marcha es necesario valorar una serie de aspectos. Uno de los mayores retos a la hora de registrar datos de un vehículo en marcha es discernir entre medidas reales y los movimientos del vehículo. Registrar medidas desde un vehículo en movimiento supone adoptar un sistema de referencia móvil, que, debido a los sistemas de suspensión de un vehículo, queda continuamente alterado por los movimientos del vehículo.

El vehículo, debido a su naturaleza de cuerpo suspendido, experimenta movimientos significativos cuando es expuesto a aceleraciones. Se distinguen dos movimientos principales generados como reacción a las aceleraciones mencionadas; el vehículo puede girar a lo largo de un eje longitudinal, dando lugar a inclinación (roll, en inglés) o un eje transversal, lo que resulta en cabeceo (pitch en inglés). Por ejemplo, al tomar una curva hacia la derecha, el vehículo se inclinará hacia la izquierda por acción de las fuerzas generadas. A su vez, un vehículo en marcha que es sometido a una deceleración significativa (durante la frenada) resultará en un movimiento en el que la parte delantera del vehículo reduce su altura y la parte trasera hace lo contrario. Estos

movimientos son de gran importancia para el modelado de los sistemas de seguridad y por ello es realmente interesante registrarlos. Sin embargo, estudiar los movimientos del vehículo directamente a partir de otros sensores del vehículo no es simple.

Este trabajo busca estudiar si es posible estimar correctamente la pendiente (sin contar con los movimientos de cabeceo en el modelo) para poder sustraer a posteriori el dato de pendiente real al registro. De esta manera, se puede disociar la pendiente del cabeceo y obtener un dato fiable del movimiento del vehículo.

## 1.1 Problema a resolver (Área)

En este proyecto se propone un algoritmo para estimar eficazmente la velocidad longitudinal de un vehículo y la pendiente de calzada por la que circula a través de un filtro Kalman aplicable para turismos de tracción delantera. Con apoyo de los departamentos de Ingeniería Informática y Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid se describe el método empleado para realizar las estimaciones en base a sensores de los que ya dispone el vehículo.

Conocer precisamente la pendiente de calzada y un valor añadido de velocidad, permite obtener de manera más precisa el estado en el que se encuentra el vehículo. Las ventajas de obtener esta información añadida son varias, desde una mejor adaptación y eficacia de los sistemas de seguridad, ya sean ABS, ESP, control de tracción, etc. hasta una posible introducción en sistemas de predicción de eficiencia, optimización de control de velocidad de cruce, entre otros. En resumen, un vehículo que dispone del dato de pendiente de calzada será más seguro y más eficiente [1].

La importancia de estimar parámetros del vehículo en base a sus sensores queda reflejada en la presencia de numerosos trabajos publicados previamente en los que se estudia este mismo problema con diferentes enfoques<sup>1</sup>. En algunos casos se ha calculado el consumo de combustible [3], en otros se ha estimado la velocidad en base a otros factores como, por ejemplo, sensores de smartphone[6], en otros se ha estudiado la pendiente en base a la altitud, información topográfica y señal gps [12], etc. Este problema, por tanto, es relevante para el desarrollo de la industria y su estudio provee un avance notable. La dificultad reside en obtener una estimación fiable y precisa, al mismo tiempo que simple y fácil de obtener, sin involucrar componentes externos, minimizando el coste del sistema.

---

<sup>1</sup> Se referencian en la bibliografía algunos trabajos que parten del uso de sensores “on-board” para realizar la estimación de parámetros del vehículo: [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [26], [29], etc.

## 1.2 Motivación

La motivación para realizar este trabajo viene dada por dos intereses, principalmente. Por un lado, resulta muy importante obtener una visión más clara acerca del estado vehicular. Saber si un vehículo se encuentra circulando por una pendiente puede alterar en gran medida la manera en la que deberían interferir los sistemas de seguridad en caso de ser necesario. La pendiente de una calzada permite actualizar de manera mucho más precisa la situación dada, teniendo en cuenta riesgo de vuelco, tipo de conducción, eficiencia, etc. Se trata de conseguir viajes más seguros y eficientes, dado que los sistemas de monitorización del coche tendrán una visión más clara y precisa del estado en el que se encuentra para cada situación.

Por otro lado, este trabajo propone una vía de reducción de costes en producción para implementar un sistema capaz de realizar estimaciones precisas de observación de estado vehicular, sin tener que instalar componentes adicionales, que aumentarían el coste de fabricación así como el peso de marcha del vehículo, y con ello, su consumo de combustible.

## 1.3 Objetivos

Para que los objetivos marcados en este proyecto tengan relevancia, las estimaciones deben cumplir los siguientes requerimientos:

**Eficiencia:** la estimación debe ser eficiente a nivel computacional para obtener resultados rápidamente y permitir ajustes en tiempo real.

**Precisión:** Se buscará el menor error posible en cada estimación, puesto que un pequeño error en uno de los cálculos puede tener grandes implicaciones en el resultado.

**Ausencia de ruido:** Las estimaciones deben ofrecer datos limpios y ausentes de exceso de ruido en las señales

**Robustez:** La estimación debe ser capaz de funcionar en multitud de vehículos, de carreteras y de situaciones de conducción.

Se ha estudiado en profundidad la manera de cumplir con estas necesidades y relacionarla con los objetivos del trabajo, descritos a continuación.

### 1.3.1 Objetivo general

En este apartado, se expone el objetivo principal de la realización de este proyecto. El objetivo general de este trabajo es realizar una estimación precisa y fiable de los parámetros deseados en base a sensores “on-board”, y que cumpla con los requerimientos citados anteriormente.



Estas estimaciones se podrán utilizar después para ajustar sistemas de seguridad, mejorar eficiencia, etc, con el fin de reconocer de manera más exacta la situación en la que se encuentra el vehículo. El filtro Kalman, explicado más adelante en detalle, es un estimador dinámico lineal que cumple con los requerimientos citados previamente.

Idóneamente, se obtendrían los resultados de la estimación en tiempo real. Sin embargo, para este trabajo, se realizan primero los ensayos para después analizar los resultados a posteriori con el filtro Kalman.

### 1.3.2 Objetivos específicos

En esta sección, se comentan algunos de los objetivos específicos del trabajo. A nivel específico, el objetivo de este proyecto consiste en primer lugar en la familiarización con los elementos necesarios para la realización del experimento. En segundo lugar, el proyecto busca obtener el estado del vehículo a través de OBD II (encontrar a través de CAN Bus y OBD II los canales identificadores de los datos necesarios), es decir, obtener la sensorización necesaria del vehículo. A continuación, se busca diseñar un algoritmo que permita realizar las estimaciones deseadas y , por último, se verifica que cumplen con los requerimientos establecidos.

## 1.4 Método de trabajo

El método de trabajo a seguir en este proyecto es de tipo experimental, puesto que se busca realizar las estimaciones a partir de datos que nos da el vehículo. Para localizar los datos se realizan ensayos. Se consideran como fases de un experimento las siguientes:

**1) Planeamiento:** se consideran y evalúan distintas aproximaciones que pueden seguirse para la solución del problema formulado. También se conoce como diseño preliminar. Se establece el plan a seguir en base a los objetivos fijados. Se estudia cuál es el objetivo final, cómo se accederá a dicho objetivo, posibles alternativas y de qué manera se estudiarán los resultados.

Para este proyecto, se estipuló la estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada como el objetivo final del trabajo y se marcaron los plazos principales a seguir para realizar el experimento. En este caso, implicó también la familiarización con los elementos necesarios y un aprendizaje de base para afrontar el trabajo.

Este aprendizaje consta de una parte teórica y otra práctica. En el factor teórico se incluye conocer el estado de la cuestión, manejar correctamente las implicaciones técnicas que se requieren y entender cómo funcionan los distintos estándares de comunicación empleados (CAN Bus y OBD II). El factor práctico del aprendizaje suma aplicar los conocimientos adquiridos, mostrar un manejo solvente de los componentes

empleados y sus funciones, y realizar un estudio de cómo se debe realizar el experimento para cumplir con los objetivos.

**2) Diseño:** se diseñan las distintas situaciones a recrear, herramientas necesarias, los ensayos a realizar y las condiciones propuestas en la fase de planeamiento. Se define un plan de experimentación, las condiciones de trabajo, los datos que se recogen, la forma de procesarlos, etc.

En el caso de este trabajo, rápidamente saltó a la vista la necesidad de poder sincronizar todos los datos recogidos, de manera que para un instante de tiempo dado, se pudiesen leer una serie de datos que correspondiesen exactamente a dicho instante de tiempo. Para la realización de este diseño, se llegó a la conclusión de emplear un solo programa que recogiese todos los datos a través de una centralita (se emplea una Racelogic VBOX, cuyos detalles y especificaciones se describen más adelante).

Por otro lado, para obtener los datos para el experimento, sería necesario acceder a los datos de la trama interna del vehículo y saber qué datos se requieren.

Para la realización de las estimaciones se emplea un Filtro Kalman. Este filtro, y sus características de funcionamiento, así como los parámetros de entrada se diseñaron en esta fase, de manera que se obtuvieran así tanto los datos necesarios como los componentes del filtro que se utilizarían.

**3) Construcción:** se pone en marcha la recreación de las condiciones diseñadas para el estudio correspondiente. Físicamente requiere tener las herramientas, máquinas y condiciones necesarias conectadas y se ejecuta su calibración.

Una vez decididos qué datos habría que obtener del vehículo, se conectó un adaptador CAN-USB al puerto OBD II del automóvil y se realizaron una serie de ensayos para identificar los canales en los que residen dichos datos. Para empezar a leer los datos, se diseñó un código que recogería todos los datos que circularan por la trama a través de OBD II y los guardaría en un fichero de ordenador, de manera que se pudiesen leer con facilidad. En esta fase se recogen todos los datos disponibles sin saber qué significan. A grandes rasgos, se busca comprender qué significan las tramas de OBD II y filtrar los canales necesarios. A través de una serie de ensayos y la utilización de filtros en Microsoft Excel se averiguaron los distintos canales de cada dato reconocido. Faltaría verificar los canales obtenidos.

Una vez diseñado el filtro Kalman y siendo conocidos los datos necesarios para la realización del experimento, también se pueden conocer los componentes requeridos para realizar el ensayo, de manera que se comenzaron a montar dichos componentes en la disposición correcta. También se configuraron los parámetros del software que se iba a emplear.

**4) Depuración:** se inicia la utilización del equipo. Aquí se descubren los imprevistos. Los resultados obtenidos en esta fase pueden llevar a algún rediseño y a cambios en la construcción u operación del equipo experimental. Al finalizar esta fase, el

experimentador debe dominar el manejo de los aparatos y conocer los factores que influyen en la incertidumbre de resultados. En caso de haber detectado un fallo de medición o de sistema durante la fase de construcción, esta fase implica realizar los cambios pertinentes que se hayan conocido. De esta manera, el siguiente ensayo permite ajustar con mayor precisión las condiciones deseadas y obtener un resultado mejor. Con cada iteración se busca obtener un resultado mejor.

En este proyecto, la fase de depuración supuso repetir una serie de ensayos para registrar correctamente los datos, puesto que al verificar se encontraron datos poco concisos en algunas mediciones. Al realizar los segundos ensayos se tuvieron en cuenta los errores registrados anteriormente y se realizaron los cambios pertinentes para garantizar el éxito.

Se detectaron algunas irregularidades en los parámetros del software de VBOX, que se subsanaron al realizar unos ensayos en mayor profundidad y encontrar fallos en la configuración.

**5) Ejecución:** Se procede a realizar los distintos ensayos propuestos para leer, registrar y almacenar los datos necesarios. En esta fase se busca obtener todos los datos necesarios para verificar la validez de los datos y poder obtener un análisis correcto en la siguiente fase.

En esta fase se comenzó a realizar los ensayos con el vehículo con todo el equipo y sus componentes montado, configurado y habiendo verificado el correcto funcionamiento del sistema.

**6) Análisis de datos:** Al analizar los datos se busca comprobar la hipótesis inicial o encontrar un resultado con respecto al estudio. Se trata de encontrar una solución al problema estudiado. Una vez encontrado, habrá que verificar que los resultados son coherentes con los distintos ensayos y situaciones estudiadas y demostrar su relación con cada resultado.

El análisis de los datos recogidos para el experimento se realizó a posteriori en este caso. Se volcaron los registros en el filtro y se ejecutó el software para simular la estimación de velocidad y pendiente de calzada

**7) Conclusiones:** Se exponen los resultados junto con las condiciones de estudio, de manera detallada, clara y que maximicen su utilidad para futuros trabajos.

Nótese que no existe una distinción clara entre fases, se sobrelapan según se desarrollan (puesto que algunas son simultáneas) y que se describen en profundidad más adelante

## 1.5 Contenido

En esta sección se describen los distintos bloques que estructuran este proyecto y el contenido resumido de cada uno de ellos. Este proyecto se divide en 8 capítulos en los que cada capítulo describe un aspecto distinto de la elaboración de este experimento.

En este primer capítulo se describe el problema a resolver y la motivación que impulsa su realización. Se indican los objetivos marcados y se establece el método a seguir durante el resto del progreso del proyecto.

En el capítulo 2 (“Estado de la cuestión”), se realiza un repaso a trabajos anteriores en esta línea de investigación y se analiza el estado de la bibliografía disponible acerca del tema estudiado. Se describen, entre otros, la necesidad de un sistema de comunicación Bus y el estado del estándar CAN Bus. También se incluye el estado de OBD II y la relación que guarda con CAN Bus. Por último, se detalla el filtro Kalman y se explica cómo realiza la estimación.

El tercer capítulo, “Aproximación experimental”, expone qué datos se recogen y en qué condiciones se miden, para obtener los registros de los ensayos. El objetivo de este capítulo es detallar toda la información referente a la realización del experimento. Se explica el objetivo final del experimento, el proceso completo de registro de datos y detalles de los ensayos. En este capítulo también se expone el vehículo seleccionado para las pruebas y las pistas de pruebas empleadas.

En el capítulo cuarto (“Resultados”), se comentan los resultados obtenidos. En primer lugar se describe cómo se analizan los registros y cómo se emplea la utilidad del filtro Kalman, describiendo los distintos modelos empleados y su argumentación. Al final del capítulo, se exponen los registros de cada ensayo y los resultados del estimador junto con un resumen de lo obtenido.

En el capítulo 5, “Discusión”, se comentan los resultados obtenidos en el capítulo anterior. Se analiza la validez del sistema así como las limitaciones a las que se adhiere este experimento, tanto por entorno como por definición del experimento. Se valora la utilidad del estimador teniendo en cuenta la generalización de los resultados.

El sexto capítulo trata las conclusiones a las que se ha llegado así como una serie de propuestas para futuras líneas de desarrollo. Se comentan los objetivos estipulados y el aprendizaje obtenido en relación con el experimento.

El capítulo 7 (“Anexo”) incluye una serie de informaciones relevantes para el proyecto, como son un plan de trabajo detallado y el presupuesto económico.

El capítulo 8, “Bibliografía”, enumera las fuentes que se han empleado para la realización de este trabajo y otros recursos que han facilitado su realización.

## Capítulo 2

# ESTADO DE LA CUESTIÓN

# Índice Capítulo 2

## Estado de la Cuestión

2. Estado de la cuestión	23
2.1 Investigación previa	23
2.2 Sistemas CAN Bus y relación entre CAN Bus y OBD II	25
2.3 CAN Bus	26
2.3.1 Aplicaciones CAN Bus	28
2.3.2 Arquitectura CAN Bus	28
2.3.3 Transmisión de datos en CAN Bus	30
2.3.4 Asignación de IDs de CAN Bus	30
2.3.5 Capas de CAN Bus	30
2.4 OBD II	31
2.4.1 Interfaces de OBD II	32
2.4.2 Protocolos OBD II	34
2.4.3 Datos disponibles a través de OBD II	35
2.4.4 Aplicaciones OBD II	35
2.4.5 Problemas de seguridad en OBD II	37
2.4.6 Ubicación del puerto OBD II	37
2.5 Filtro Kalman	37

## 2 Estado de la cuestión

En este capítulo se repasa el desarrollo de trabajos anteriores en esta línea de investigación y se detalla el estado actual de las tecnologías relevantes del experimento.

El problema a resolver en este trabajo no es novedoso. Numerosos estudios han buscado aplicar distintos modelos de ensayo para obtener correctamente las estimaciones de parámetros del vehículo. Se repasa brevemente una lista de publicaciones con el fin de entender mejor el estado actual de desarrollo del experimento. En la mayoría de los casos, se trata de estudios que buscan estimar una serie de valores del vehículo, habiendo centrado y verificado los resultados en un tipo de vehículo específico (camiones, motocicletas, turismos eléctricos) o unas condiciones específicas (como por ejemplo, baja adherencia). Se presta especial atención a los trabajos que tratan de estimar los datos relevantes para este experimento (velocidad longitudinal y pendiente) y se selecciona un modelo principal y una alternativa para verificar si es posible aplicarlo al tipo de vehículo que se prueba en este experimento. Este proyecto emplea un vehículo de tracción delantera (el eje delantero es el eje motriz).

Más adelante, se repasa el estado tecnológico de desarrollo actual de los distintos sistemas que posibilitan este experimento. Es importante obtener un conocimiento de base de estos sistemas y su funcionamiento para afrontar correctamente el método de trabajo.

Por último, se introduce el filtro Kalman y sus características más relevantes. Se trata de un estimador lineal altamente potente que obtiene resultados precisos y fiables a partir de cálculos simples. Es útil para este trabajo por la presencia de ruido en las señales (sistema y medida). Una ventaja de este filtro es su capacidad para calcular consistentemente datos bajo condiciones de ruido de señal.

### 2.1 Investigación previa

Para la realización de este proyecto, es necesario conocer la velocidad longitudinal del vehículo. Sin embargo, instalar un sensor de velocidad longitudinal es costoso y aumenta el peso. Para facilitar la realización de este estudio, se propone un estimador de velocidad. La estimación de velocidad se basará en las lecturas de datos de velocidad de las cuatro ruedas y un acelerómetro. Adicionalmente, se utilizará un sensor externo de velocidad longitudinal (antena GPS) para verificar las medidas tomadas.

Existen trabajos publicados previamente que tratan precisamente este problema, la estimación de velocidad longitudinal y de pendiente de calzada en vehículos. A continuación se encuentra un breve repaso sobre estos trabajos previos y se contrasta

con el método propuesto en este proyecto. Se explica qué han resuelto, cómo se han realizado y qué se puede aprender de los resultados previos. Es importante valorar los trabajos publicados previamente para ver qué problemas se han podido encontrar otros investigadores y poder encontrar diferencias con el trabajo expuesto en este documento.

Varios trabajos proponen métodos para la estimación de velocidad longitudinal del vehículo. Se cita una serie de referencias de trabajos previos que se encuentran en la bibliografía del capítulo 8. Es interesante ver las distintas fuentes de datos empleadas para los trabajos. Por ejemplo, [6] estima la velocidad longitudinal a partir de los datos obtenidos por OBD II y los sensores GPS de un smartphone. Emplea también una antena GPS dedicada para verificar los datos obtenidos. [7] y [8] buscan asimismo estimar la velocidad longitudinal. En ambos casos, se utiliza un filtro Kalman Adaptativo (AKF) para relacionar la estimación con los sistemas de frenada ABS.

Por otro lado, también se encuentran varios trabajos dedicados a estimar la pendiente de calzada. En 2005, un estudio se centra en la predicción de pendiente a partir de la estimación de pendiente de calzada en conjunción con el uso de GPS [9], aunque el trabajo está destinado a aumentar la eficiencia en base a esta predicción. Posteriormente, en 2008 [4] se estima la pendiente de calzada y dinámica vehicular. Para ello se empleó un modelo no lineal del vehículo, un filtro Kalman Extendido (EKF) y un observador Lünberger. Los datos utilizados fueron la velocidad rotacional de las ruedas, el variación de guiñada del vehículo (yaw rate) y la posición del volante. En 2010 se propone un estimador de pendiente de calzada utilizando un filtro Kalman simple, al igual que en este trabajo [1]. Sin embargo, se aplican los cálculos a camiones, enfocando el objetivo al aumento de eficiencia en transporte industrial. Adicionalmente, se propone un filtro que varía en función de la fuerza de frenada para compensar la acción del sistema ABS, por lo que se considera un filtro adaptativo (AKF). En 2011 se publica un estudio que estima la pendiente de manera “on-line” (en tiempo real), aunque también se centra en estimar la masa del vehículo y se emplearon camiones para verificar los resultados.

Es en 2013 cuando se presenta un trabajo que estima conjuntamente la velocidad longitudinal empleando un filtro Kalman [2]. Este trabajo empleó los datos de OBD II, acelerómetro y GPS para realizar la estimación, aunque este estudio se enfocó en la utilización de vehículos híbridos y eléctricos. Por otro lado, al disponer de pista de baja adherencia (hielo) en llano y en pendiente, se consideraron los fenómenos de pérdida de tracción para la estimación. Para esto, se empleó un filtro Kalman adaptivo. El modelo que propone Yunlong Gao en su publicación parece funcionar correctamente en las condiciones probadas. Por ello, se pretende emular el modelo propuesto para vehículos eléctricos y de tracción completa en un vehículo de tracción delantera, para observar si el modelo propuesto en [2] es válido en esta configuración motriz. Se utiliza el estudio de Yunlong Gao como modelo principal a implementar.

Por otro lado, se comprobará el modelo propuesto por Tobias Bonnedahl en [1]. Este estudio pretende estimar velocidad longitudinal y pendiente de calzada también a través de un filtro Kalman. Sin embargo, el modelo que emplea para la implementación



es distinto en varios aspectos, por lo que es interesante. El mayor inconveniente para utilizar este modelo como modelo principal es que ha sido diseñado para ser aplicado en camiones. Puesto que se considera más parecida la dinámica de un turismo eléctrico a la de un turismo de tracción delantera que la de un camión, este modelo no se considera como modelo principal a verificar. Sin embargo, se considera como primera alternativa para validar.

El proyecto descrito en este documento se centra por tanto en la estimación conjunta de velocidad longitudinal y de pendiente de calzada. Se emplea un filtro Kalman estándar o básico, de manera que la estimación es lineal. Se aplican los conocimientos adquiridos en los trabajos previos para aplicarlo en vehículos de tracción delantera, sin considerar efectos de pérdida de tracción. Según la Asociación Española de Fabricantes de Automóviles y Camiones (ANFAC), del número total de turismos vendidos durante el año 2015 en España, los modelos más vendidos disponían todos de configuración de tracción delantera (al menos en algunas de sus versiones) [19]. Esto refuerza la relevancia de este trabajo, al estimar velocidad y pendiente de calzada en la configuración de tracción más común en el parque móvil español.

Se busca la mayor simplicidad posible mientras se mantiene una estimación precisa y fiable. Por ello, en este trabajo se emplean solo como fuentes de datos OBD II, acelerómetro y una antena GPS para validar las mediciones.

Se describe a continuación el estado actual de las tecnologías empleadas, para informar de la relevancia temporal de la solución propuesta. Algunas de estas tecnologías se actualizan con frecuencia y reciben avances periódicos, por lo que es importante describir el panorama actual y el punto de desarrollo en el que se realiza este estudio.

Primero se describirá la relación básica entre CAN Bus y OBD II y después se explicará cada protocolo por separado.

## 2.2 Sistemas Bus y relación entre CAN Bus y OBD II

Para enviar señales eléctricas de un punto a otro es necesario usar cables (sin tener en cuenta tecnologías wireless). La manera más simple sería utilizar un cable por cada bit de información. Un bit de información permite enviar datos como “Si/No”, de manera que se podría usar como respuesta a una pregunta del tipo “¿están encendidas las luces?”. Si las luces están encendidas, en ese cable habrá un voltaje (5 voltios), de no estarlo, el voltaje sería cero.

Sin embargo, un vehículo actual necesita mandar más que un solo bit; en realidad necesita mandar una multitud de datos, cada uno de ellos de varios bytes de longitud, lo que implicaría usar una gran cantidad de cable. Usar más cable aumenta el peso y el coste, dos aspectos que los fabricantes necesitan mantener minimizados dentro de lo posible para seguir ofreciendo un producto competitivo. A mayor complejidad, serán necesarios más cables, y considerando que los vehículos de hoy en día cuentan con

varios ordenadores a bordo, es necesaria una manera de simplificar y reducir la cantidad de cable necesario por vehículo.

La solución a este problema es el uso de sistemas Bus, una manera de transmitir más información con menos cables, entre otras ventajas. De este modo se simplifica el cableado y se reduce la cantidad necesaria por vehículo (aún así, un vehículo actual cuenta con varios kilómetros de cable para abastecer cada sensor).

El sistema CAN Bus es el sistema Bus más importante en un vehículo, se trata de un sistema capaz de recibir, transportar y enviar toda la información que pasa por un automóvil con solamente dos cables (se explicará en mayor detalle en el punto b.). OBD II es un protocolo de nivel mayor utilizado para diagnóstico de parámetros del vehículo. El vehículo es capaz de reconocer, entender y responder a los mensajes que le llegan a través de OBD II, y se transmiten a través del bus CAN. Para mayor claridad, se adjunta la siguiente figura:

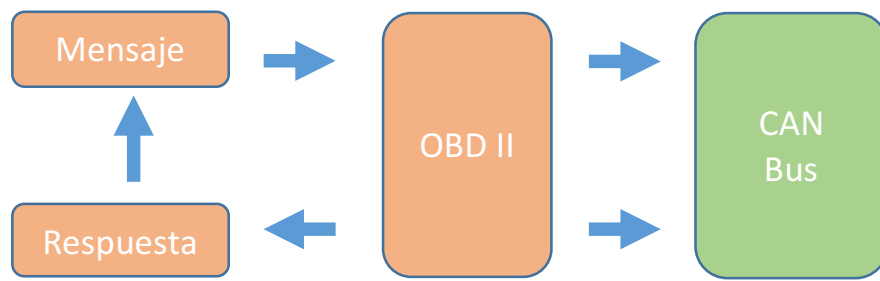


Figura 1. Relación entre CAN Bus y OBD II

## 2.3 CAN Bus

El bus CAN (Control Area Network) se desarrolló para obtener comunicación entre microcontroladores sin necesidad de utilizar un ordenador o procesador externos. Se basa en protocolos de mensaje, diseñado inicialmente para simplificar los complejos cableados de los automóviles, pero hoy en día se utiliza en multitud de aplicaciones distintas [21].

Se trata de un bus de comunicaciones definido por la Organización Internacional de Normalización (ISO). En su diseño, aparte de la necesidad de simplificar cableados, se incluyó como requerimiento ser altamente inmune a interferencias eléctricas, tener habilidad de autodiagnosticarse y ser capaz de reparar datos erróneos.

El desarrollo comenzó en 1983 en Bosch (llamada Robert Bosch GmbH en aquel momento). El protocolo se presentó oficialmente en 1986 durante el congreso de la SAE (Sociedad de Ingenieros de Automoción) en Detroit, Michigan. Los primeros chips capaces de controlar CAN llegaron al mercado en 1987, por parte de Intel y Philips. En

1988 comenzó la producción del primer automóvil con cableado basado en CAN, el BMW Serie 8.

El funcionamiento de CAN es relativamente sencillo: se conectan todos los dispositivos existentes en el vehículo a un mismo bus, y cada punto de conexión se denomina nodo. Para enviar un mensaje, un dispositivo vierte el mensaje al bus y todos los demás dispositivos pueden escuchar este mensaje. Para poder entender correctamente qué dispositivo envía cada mensaje, cada uno de ellos tiene un identificador propio. Los dispositivos que escuchan, deciden si les interesa este mensaje en base a este identificador. Por último, los distintos dispositivos que reciben mensajes relevantes, verifican los datos recibidos, con el fin de poder descartar errores en la transmisión. La totalidad de los mensajes se envían por turnos, es decir, nunca se vierten dos mensajes simultáneamente al bus, cada dispositivo debe esperar su turno y mandar el mensaje deseado de uno en uno.

Debido a la fiabilidad y sencillez de este sistema, CAN es un bus robusto y eficaz en su labor de mantener a salvo los datos necesarios mientras se reduce considerablemente el número de cables necesarios. Es por ello que es el sistema más utilizado en automoción. Los cables que utiliza este bus en vehículos están diseñados para soportar cambios de temperatura, vibraciones, interferencias, etc.

La velocidad de transmisión de CAN bus es capaz de llegar hasta 1 Mbps, sin embargo en la práctica se restringe entre 125 y 500 kbps para evitar errores y facilitar el funcionamiento correcto.

CAN bus es uno de los cinco protocolos utilizados en diagnósticos de a bordo (OBD II) y el empleado en el vehículo de este proyecto.

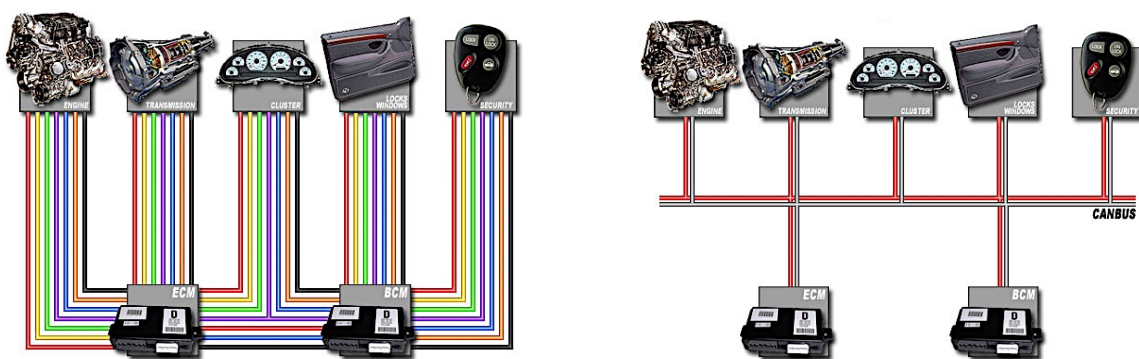


Figura 2. Ejemplo de cableado pre-CAN-Bus y post-CAN-Bus [27]

### 2.3.1 Aplicaciones CAN BUS

El Bus CAN ofrece numerosas formas de aplicación interesantes, entre las más importantes están:

**Automoción:** hoy en día, los vehículos pueden llegar a tener hasta 70 unidades de control (ECU) para distintos subsistemas. El controlador del motor suele ser el procesador más grande, mientras otros son utilizados para transmisión, airbags, ABS, control de velocidad de cruce, dirección asistida eléctrica, sistemas de audio, ventanillas eléctricas, ajuste de espejos, batería, sistemas de recarga de híbridos/eléctricos, etc. Pese a que algunos de estos subsistemas podrían considerarse independientes, para otros es fundamental la comunicación sistema a sistema, ya sea para controlar actuadores o recibir información de otros sensores. Este era el fin inicial del desarrollo del estándar CAN.

**Industrial:** debido al bajo coste y consumo de algunos controladores y procesadores CAN, este bus se puede encontrar como bus general en numerosos entornos de automatización.

**Ciclismo:** en 2009 Shimano introduce el cambio Di2 en su gama de carretera. Más tarde, el sistema BionX también utiliza este sistema en su motor de marcha.

**Entretenimiento:** Nismo, la rama deportiva de Nissan, utiliza su bus CAN para recrear la información recopilada en el simulador de carreras Gran Turismo, con el fin de ofrecer poder competir contra uno mismo en el simulador a partir de los datos recogidos por el GPS.

### 2.3.2 Arquitectura de CAN Bus

Can es un estándar de bus multi-master para conectar ECUs (Electronic Control Units), también conocidos como nodos. Dos o más nodos requieren una red CAN para comunicarse. La complejidad de un nodo puede partir de un simple dispositivo I/O (entrada/salida) hasta llegar a un ordenador con interfaz CAN y software sofisticado. También puede ser un puerto de conexión que permite acceder vía USB o Ethernet a un PC.

Cada nodo está conectado a la red a través de un sistema de dos cables. Estos cables tienen una resistencia de 120 Ohmios. El estándar ISO 11898-2 (High-speed CAN) utiliza un bus lineal con una resistencia de 120 Ohmios en cada extremo, según este esquema:

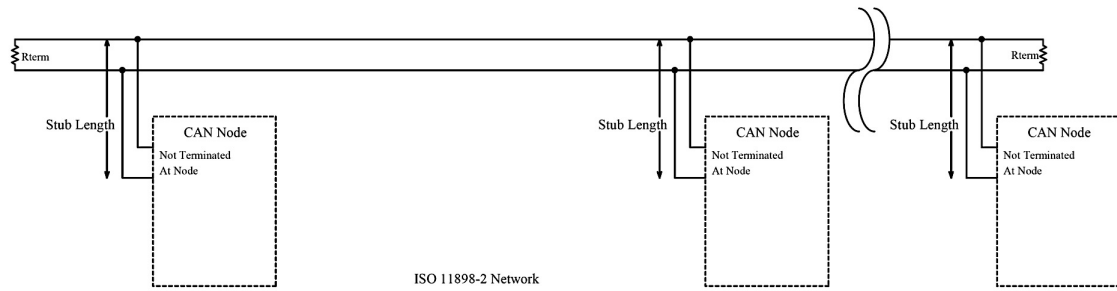


Figura 3. Esquema de CAN Bus lineal de alta velocidad

En general, para aplicaciones de automoción e industriales se utiliza CAN de alta velocidad, donde el bus recorre el entorno de un extremo a otro. CAN tolerante a errores o de baja velocidad se emplea cuando varios nodos deben interconectarse. Según el estándar ISO, es necesario mantener el bus dentro de un rango de voltajes máximos y mínimos, aunque no especifica cómo debe mantenerse este rango.

Cada nodo requiere:

- **Unidad de procesamiento central** (microprocesador, procesador externo, etc): el procesador externo decide qué significa el mensaje recibido y qué mensaje quiere transmitir. Puede estar conectado a sensores, actuadores, controladores, etc.
- **Controlador CAN:** Suele estar integrado en el microprocesador: el controlador CAN guarda los bits recibidos hasta que el mensaje completo está disponible para después pasarlos a la unidad de procesamiento. Por otra lado, en caso de enviar mensaje, manda un mensaje a transmitir al controlador CAN, que convierte el mensaje en bits a transmitir cuando el bus esté libre
- **Transceiver MAU** (Medium Acces Unit según ISO 11909-2/3): en caso de recibir, convierte el flujo de datos de nivel bus a nivel controlador CAN. Suele disponer de circuitos de seguridad para proteger el controlador. En caso de transmitir un mensaje, convierte los mensajes del controlador a nivel bus CAN

Cada nodo es capaz de mandar y recibir mensajes, pero no simultáneamente. Un mensaje, o Frame, consta de identificador ID y hasta 8 bytes de datos, entre otros. El ID representa la prioridad del mensaje. El mensaje es transmitido al bus y puede ser recibido por todos los nodos.

### 2.3.3 Transmisión de datos en CAN Bus

La transmisión de datos CAN usa un método de arbitrarización sin pérdida para la resolución de contenido. Este método requiere que todos los nodos estén sincronizados y muestreen cada bit de la red CAN al mismo tiempo. Los datos son transmitidos sin ayuda de una señal de reloj (clock).

Las especificaciones CAN utilizan los términos de bit “dominante” y “recesivo”. Dominante significa que el bit es un 0 lógico (en el cual el transmisor excita activamente el valor a un voltaje) y recesivo es un bit a valor 1 lógico (el resistor devuelve pasivamente el voltaje). El valor predeterminado es recesivo. Si un nodo transmite un bit dominante y otro nodo transmite un bit recesivo se da una colisión, en la que el bit dominante tiene preferencia. Esto implica que no haya retraso (delay) en la retransmisión de señales de mayor prioridad y que la señal de menor prioridad sea enviada por el nodo automáticamente 6 bits de reloj después de la finalización del mensaje prioritario. Esta función hace del sistema CAN una opción recomendada para sistemas de comunicación con mensajes prioritarios en tiempo real.

### 2.3.4 Asignación de Ids de CAN Bus

Los Ids (o identificadores) de cada nodo en un bus CAN deben ser únicos, para poder organizar claramente la prioridad de mensajes de la red.

A principios de 1990, la selección de IDs para mensajes se hacía solo en base al mensaje y al nodo emisor. Sin embargo, al ser utilizado también como indicador de prioridad, mostró una eficacia baja en tiempo real. Al determinar los IDs en base al deadline del mensaje, el menor valor numérico mostrará la mayor prioridad. Esto supone un aumento de velocidad de transmisión.

### 2.3.5 Capas de CAN Bus

El protocolo CAN, como muchos otros protocolos de red, se puede descomponer en las siguientes capas:

- **Capa de aplicación**
- **Capa Objeto:** se encarga del manejo y filtrado de mensajes y estado
- **Capa de Transferencia:** La mayor parte del estándar CAN se centra en la capa de transferencia. Esta capa recibe los mensajes de la capa física y los transfiere a la capa objeto. Es responsable del bit timing y la sincronización, frames del mensaje, distribución de IDs, detección de errores, señalización y corrección de errores.

- **Capa física:** el estándar ISO 11898-2:2003 especifica los aspectos eléctricos del conector, como son voltaje, intensidad y número de conexiones. Sin embargo, los aspectos mecánicos del conector (tipo de conector, pin-out, colores, números, etc) no están especificados. Esto resulta en la presencia de conectores personalizados en vez de estandarizados, lo que en ocasiones presenta inconvenientes al acoplar distintos módulos que no comparten el mismo conector.

## 2.4 OBD II

En vez de instalar sensores auxiliares para el proyecto, se utilizan los existentes en el vehículo. Para acceder a los datos que obtienen estos sensores se emplea el puerto OBD II.

OBD II son las siglas para “On Board Diagnostics II” (diagnóstico de a bordo en español), representan la segunda iteración de sistemas incorporados en el hardware y el software de un vehículo para monitorizar el estado y correcto funcionamiento de multitud de componentes que puedan afectar a la expulsión de emisiones a la atmósfera.

El sistema verifica rutinariamente que cada componente funcione dentro de unos márgenes establecidos. En caso de encontrar un parámetro fuera del rango de operación habitual, una señal lumínica se ilumina en el cuadro de mandos del conductor con el mensaje “Check Engine”, indicando el funcionamiento anormal y avisando al conductor de la necesidad de revisar el vehículo a corto plazo. Con la aparición del aviso lumínico, los mensajes de error se guardan en un formato universal de códigos en una memoria del vehículo para ser recuperados por un técnico, de modo que éste sea capaz de identificar y arreglar correctamente el problema.



Figura 4. Ejemplo de un conector OBD II en un Hyundai i30

La necesidad de incorporar un puerto OBD en cada vehículo vendido se implantó en 1991 en Estados Unidos, con el fin de mejorar los valores de emisiones que generaba cada vehículo y garantizar esos valores durante la vida útil. La primera versión de OBD (desarrollada en 1983) no era totalmente efectiva, puesto que el sistema solo revisaba algunos de los parámetros relacionados con las emisiones. Por otro lado, estos sensores no estaban calibrados para reaccionar dentro de unos rangos de funcionamiento establecidos. OBD permitía recolectar información acerca de los valores de cada sensor y obtener diagnósticos primitivos sobre errores de funcionamiento pero no era capaz

de analizar por sí solo el estado de las emisiones generadas a partir de los valores que recibían los sensores. Debido a esta desventaja se desarrolló OBD II, cuyas principales diferencias son la inclusión de sondas Lambda a lo largo del catalizador y la integración de unos rangos de funcionamiento para detectar automáticamente cualquier anomalía.

OBD II es un sistema ventajoso para multitud de públicos por varias razones. Para técnicos de taller es una herramienta vital para facilitar la revisión y reparación de vehículos, siendo un método simple y efectivo de recuperar los datos acerca de componentes que fallan y las condiciones de funcionamiento bajo las que se dio el fallo. Los conductores del vehículo se benefician de OBD II debido a la función de aviso, por la que se pueden evitar averías más graves y mejorar las rutinas de mantenimiento. Otro público que busca incluir sistemas OBD en sus vehículos son los propios fabricantes, que pueden recabar información acerca de las averías más frecuentes, fallos de lotes y mejorar los servicios prestados hacia el consumidor. Por último, se benefician también las agencias estatales, puesto que pueden garantizar una homogeneidad en las emisiones de un vehículo a lo largo de su vida útil y así estudiar el nivel de emisiones para el parque móvil con aproximaciones más precisas.

### 2.4.1 Interfaces de OBD

Existen varias interfaces físicas para OBD. En esta sección se comentan algunas de las más relevantes, aunque existen más. Estas interfaces son:

**OBD I:** La motivación detrás de OBD fue obtener unos valores de emisiones realísticos a lo largo de la vida útil de un automóvil. Los códigos de error (DTC) de OBD I se pueden encontrar sin necesidad de utilizar máquinas de escaneo de errores sofisticadas. Cada fabricante implementó su propia interfaz, posición y protocolo de acceso a los datos, aunque en general comparten la forma de alertar al conductor de un error en los valores registrados: parpadeando la luz “Check Engine” en un patrón específico se comunica cada código de error. Conectando los pines necesarios para cada fabricante al OBD propio, una pantalla devolvía un número de dos dígitos que permitía saber de qué error se trataba.

**OBD 1.5:** se refiere a una implementación parcial de OBD II por parte de GM en 1994 y 1995 en algunos vehículos. Seguía basándose en la conexión ALDL y para poder acceder a los códigos DTC de OBD 1.5 era necesaria una máquina específica compatible con OBD 1.5. Esta versión de OBD incorpora una serie de registros adicionales, tales como PCM, CCM, radio, sistema de airbags, sistema de selección de modo de conducción, indicador de presión de neumático baja y sistemas de entrada al vehículo de confort (keyless entry). OBD 1.5 también fue utilizado en algunos vehículos de Mitsubishi (95-97), algunos Volkswagen que incorporaban el motor VR6 y en el Ford Scorpio desde 1995.

**OBD II:** Supone una mejora tanto en capacidad de registro como en estandarización. El estándar OBD II especifica el tipo de conector y su pinout, los protocolos de señales



eléctricas y el formato de mensaje. También permite el acceso a una serie de parámetros a monitorizar y explica cómo codificar cada registro. Un pin del conector actúa como puerto de alimentación para el dispositivo de escaneo, que obtiene electricidad de la batería del vehículo, lo que evita tener que alimentar el dispositivo externamente. Sin embargo, existe la posibilidad de realizar la alimentación externa en caso de registrar algún tipo de funcionamiento inusual en la batería del vehículo. Debido a la estandarización, un solo dispositivo de diagnóstico permite acceder los registros del ordenador de a bordo de infinidad de modelos y marcas distintas. Pese a ser concebido inicialmente como puerto de acceso para los registros de emisiones, los fabricantes han decidido adoptar OBD II como único puerto para acceder a cualquier información relevante del vehículo. Los códigos DTC de OBD II, que por primera vez suponen una lista extensible, son un número de cuatro dígitos precedidos por una letra: P (Powertrain) para motor y transmisión, B (Body) para el exterior del vehículo, C (Chassis) para el bastidor y U (network) para la red de transmisión.

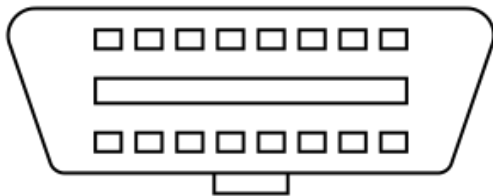


Figura 5. Conector OBD II Tipo A

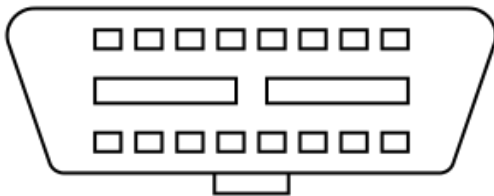


Figura 6. Conector OBD II Tipo B

La especificación SAE J1962 que se adoptó como conector estándar para OBD II propone dos interfaces de hardware, llamadas tipo A y tipo B. Ambos son conectores hembra de 16 pines (2x8) en forma de D. Sin embargo, la presencia de una rendija que separa ambas filas de pines no es igual en el conector A (rendija continua) y el conector B, en el que la rendija se ve interrumpida en la mitad [22].

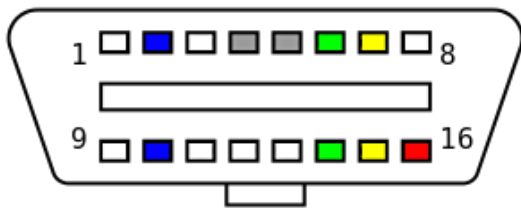


Figura 7. Posibles Pin-outs de OBD II (en relación con tabla 1)

1	Según Fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>VW/Audi/BMW: +12V para indicar al dispositivo que el contacto está activado</li> <li>Ford/FIAT: CAN High del sistema de infoentretenimiento</li> <li>GM: J2411 GMLAN/SWC/Entrada CAN</li> </ul>	9	Según Fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>BMW: Señal de tacómetro (RPM)</li> <li>GM: ALDL de 8192 bit/s</li> <li>Ford: CAN Low del sistema de infoentretenimiento</li> </ul>
---	--	---	---

2	Bus Positive Line de SAE J1850 PWM y VPW	10	Bus Negative Line of SAE J1850 PWM only (not SAE J1850 VPW)
3	Según Fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ford: DCL (+) , Medium Speed CAN High</li> <li>• Chrysler: CCD Bus (+)</li> </ul>	11	Según Fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ford: DCL (-), Medium Speed CAN Low</li> <li>• Chrysler: CCD Bus</li> </ul>
4	Toma de tierra del bastidor	12	Según Fabricante
5	Toma de tierra de señal	13	Según Fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ford: FEPS – Voltaje de programación PCM</li> </ul>
6	CAN HIGH (ISO 15765 and SAE J2284)	14	CAN Low (ISO 15765-4 and SAE J2284)
7	K-Line of ISO 9131-2 and ISO 14230-4	15	L-Line of ISO 9141-2 and ISO 14230-4
8	Según fabricante: <ul style="list-style-type: none"> <li>• BMW: Segunda K-Line para sistemas no OBD II</li> <li>• FIAT: CAN Low del sistema de infoentretenimiento</li> </ul>	16	Voltaje de batería: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo A: 12V/4A</li> <li>• Tipo B: 24V/2A</li> </ul>

Tabla 1. Muestra de los posibles Pin-outs de OBD II

A diferencia del OBD I, para OBD II el puerto de acceso ha de estar a una distancia menor de 2 pies (0,61 metros) desde el volante (a excepción de tener una exención por parte del fabricante, aunque aún así debe quedar accesible desde el puesto de conducción).

**EOBD:** La denominación “European OBD” equivale al OBD II europeo, conciernen a todos los vehículos en la categoría M1 (no más de 8 pasajeros y una tara de vehículo de máximo 2.500 Kg) matriculados en los estados miembros de la UE desde Enero de 2001 para vehículos de gasolina y Enero de 2004 para vehículos de combustible diésel. La implementación de conector, protocolo e interfaz son las mismas que en OBD II (SAE J1962). Con la introducción de los estándares de emisiones Euro V y Euro VI los rangos de valores admisibles serán menores.

**EOBD2:** este término se acuñó por parte de los departamentos de marketing y hacen referencia a algunas funciones extra que no están implementadas en OBD II o EOBD. En este caso, la E inicial es de “Enhanced” (mejorado).

## 2.4.2 Protocolos OBD II

Existen cinco protocolos de señal compatibles con OBD II. La mayoría de vehículos solo incorporan uno de ellos, CAN. Según los pines presentes en el conector J1962, suele ser posible deducir qué protocolo es el necesario. Los protocolos disponibles para OBD II son:

- **SAE J1850 PWM** (Pulse-width modulation – 41.6 kB/s, estándar para Ford Motor Company)
- **SAE J1850 VPW** (Variable pulse width – 10.4/41.6 kB/s, estándar para GM)
- **ISO 9141-2**
- **ISO 14230 KWP2000** (Keyword Protocol 2000)
- **ISO 15765 CAN (250 – 500 kbit/s)**

Los pinouts de todos los protocolos OBD II utilizan el mismo conector aunque la configuración de los pines sea distinta. Los únicos pines que no varían en función son el Pin 4 (toma de tierra de batería) y el Pin 16 (polo positivo de batería).

### 2.4.3 Datos disponibles a través de OBD II

OBD II permite acceder a una serie de datos de la unidad de control de motor (ECU) a través de un protocolo que se define en el estándar SAE J1979, por el cual se obtienen distintos datos a partir de unos comandos específicos. Los distintos parámetros a los que se permite el acceso se señalizan por “números de identificación de parámetros”, o PID, todos ellos definidos en SAE J1979. Sin embargo, los fabricantes no están obligados a implementar todos los PIDs listados en SAE J1979 y se les permite incluir PIDs propios. Al solicitar un PID, el sistema permite acceder tanto a información en tiempo real de distintos parámetros como a DTC guardados en la memoria del ordenador de a bordo por errores que hayan surgido anteriormente.

### 2.4.4 Aplicaciones OBD II

Para acceder a las funciones que habilita OBD, existe una variedad de equipos externos que pueden ser utilizados, desde dispositivos genéricos y simples hasta dispositivos altamente sofisticados que pueden servir para otros fines.

**Herramientas de mano:** dispositivos simples y resistentes. Dirigidos al consumidor, permiten leer y eliminar errores. Algunos dispositivos más avanzados permiten acceder a diagnósticos más avanzados, modificar parámetros de la ECU, acceder a sistemas distintos (tales como ABS o airbags, etc) y monitorizar en tiempo real los parámetros del motor para elaborar gráficas y modificar las prestaciones del motor.

**Dispositivos móviles:** permiten el acceso a OBD con un teléfono móvil o tablet, a través de un conector específico de OBD (USB, Bluetooth, Wifi, etc)

**Herramientas de Ordenador:** conectando el puerto OBD al PC mediante un cable USB permite acceder a una variedad de funciones distintas. En general, facilitan guardar una

gran cantidad de registros para monitorizar valores a largo plazo, ofrecen una mayor resolución en pantalla y la capacidad de utilizar distintos softwares.

**Data loggers:** dispositivos diseñados para recopilar registros durante el funcionamiento del vehículo para su posterior análisis. Permite estudiar el comportamiento del conductor, por lo que algunas aseguradoras reducen sus primas a cambio de instalar un dispositivo de este tipo en el vehículo asegurado. Los datos se pueden sincronizar de manera periódica, ser transmitidos automáticamente o recuperar después de un accidente.

**OBD para control de emisiones:** en algunos países, se utiliza OBD II para controlar las emisiones en las inspecciones técnicas. Puesto que la memoria registra cualquier error relacionado con las emisiones, puede ofrecer un resultado más preciso que el control por humos para verificar que el vehículo cumple con los estándares. Se practica en EEUU y en Países Bajos.

**Instrumentación suplementaria:** en el caso de instalar instrumentación suplementaria para ser mostrada al conductor, el puerto OBD pasa a realizar una función distinta a la transmisión de errores, datos y registro de información. Esta funcionalidad permite observar corriente de la batería, vacío de admisión, fuerza de soplido de turbo, etc. Esta instrumentación puede tomar forma de ordenadores de a bordo específicos, dispositivos móviles, GPS, etc.

**Telemática:** en la actualidad, OBD II pasa a tomar un papel cada vez más importante para realizar seguimientos de vehículos de flota, monitorizar la eficiencia y gasto de combustible, prevención de conducción insegura, etc. Pese a no ser el uso destinado inicialmente, el acceso a datos como velocidad de vehículo, RPM, posición GPS, estado de llenado de tanque de combustible permite unificar los datos para hacer el seguimiento de los vehículos. OBD II también se emplea para bloquear la señal de teléfono móvil durante la conducción.

## 2.4.5 Problemas de seguridad en OBD II

Investigadores de las universidades de Washington y California encontraron que es posible ganar el control sobre un vehículo a través de su puerto OBD II [24]. Los estudios permitieron hasta instalar remotamente un nuevo software sobre la ECU del vehículo atacado. Se han registrado casos de robo de vehículos a través de un ataque OBD, sin necesidad de utilizar una llave. La razón principal para este “hueco” de seguridad es la tendencia de los fabricantes de dejar abierto el sistema para implementar nuevas funciones en el futuro.

## 2.4.6 Ubicación del conector OBD II

El puerto OBD se puede encontrar en la gran mayoría de vehículos del parque móvil, sin embargo, la ubicación de este conector no está estandarizada y varía según el fabricante y modelo estudiado. Se puede encontrar cerca del reposapiés izquierdo del conductor, debajo de la columna de dirección, oculta detrás de un embellecedor, en la consola central, etc. Como se ha mencionado anteriormente, para cumplir con el estándar de interfaz OBD II, el conector debe encontrarse siempre a menos de 2 pies (0,61 metros) de distancia del volante.



Figura 8. Ubicación del puerto OBD II en un Hyundai i30

## 2.5 Filtro Kalman

El filtro Kalman, también conocido como estimador lineal, obtiene su nombre de su co-inventor, Prof. Rudolph Emil Kalman [20]. Se describió por primera vez en 1958 junto a P. Swerling. A continuación, Kalman siguió publicando trabajos en esta línea de estudio en 1960 y 1961. Este filtro se usa ampliamente en numerosas aplicaciones tecnológicas, sobre todo para guiar y controlar vehículos y naves espaciales. También se emplea en aplicaciones de procesamiento de señales, como por ejemplo en econometría o teoría de control.

El filtro Kalman es un algoritmo que estima variables desconocidas a partir de mediciones con ruido. Conocido el ruido en la estimación, el filtro Kalman minimiza el error de varianza de la estimación. Al tratarse de un algoritmo recursivo, este puede ejecutarse en tiempo real usando únicamente las mediciones de entrada actuales, el estado calculado previamente y su matriz de incertidumbre, no requiere ninguna otra información adicional. Esto lo hace rápido, eficiente y preciso (varios requerimientos impuestos anteriormente).

El filtro Kalman se emplea principalmente para estimar estados de un proceso, ya sea en pasado, presente o futuro. Se puede configurar para manejar datos discretos como continuos. Cuando el filtro se adapta para estudiar un modelo no lineal, se emplea un filtro Kalman Extendido (EKF). Por otro lado, también existen modelos en los que el filtro debe cambiar en base a otras variables. En este caso, se habla de un filtro Kalman adaptativo (AKF), puesto varía sus parámetros para adaptarse al cambio.

El filtro de Kalman típico se basa en la discretización de un sistema, por ejemplo:

$$\begin{aligned}x_k &= A_{k-1}x_{k-1} + B_{k-1}u_{k-1} + w_{k-1} \\y_k &= C_k x_k + v_k\end{aligned}\tag{Ec. 1}$$

donde  $A_{k-1}$  y  $B_{k-1}$  son la matriz de sistema y la matriz de entrada, respectivamente.  $w_{k-1}$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero y covarianza  $Q_k$  en el instante  $k$ , y  $v_k$  es ruido blanco de valor promedio igual a cero covarianza  $R_k$  en el instante  $k$ . Es decir,  $w_k$  y  $v_k$  siguen distribución Gaussiana de manera que:

$$\begin{aligned}w_k &\sim N(0, Q_k) \\v_k &\sim N(0, R_k)\end{aligned}\tag{Ec. 2}$$

donde  $Q_k$  y  $R_k$  son las matrices de error de covarianza del sistema y de la medición, respectivamente. Aparte,  $u$  es la señal de control mientras que  $y$  es la señal de medida.

Establecido esto, se puede escribir el filtro Kalman como:

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k-1} &= A_{k-1}\hat{x}_{k-1|k-1} + B_{k-1}u_{k-1} \\P_{k|k-1} &= A_{k|k-1}\hat{P}_{k-1|k-1}A_{k|k-1}^T + Q_{k-1} \\K_k &= P_{k|k-1}C_k^T(C_k P_{k|k-1}C_k^T + R_k)^{-1} \\ \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - C_k\hat{x}_{k|k-1}) \\P_{k|k} &= (I - K_k C_k)P_{k|k-1}\end{aligned}\tag{Ec. 3}$$

Donde  $\hat{x}_{k|k}$  es el resultado de la estimación de las variables de estado en el paso  $k$ ,  $\hat{x}_{k|k-1}$  es la predicción del estado en el paso  $k$ ,  $P_{k|k} = \{(\hat{x}_k - x_k)(\hat{x}_k - x_k)^T\}$  es la matriz de estimación de covarianza del error.  $y_k$  es la matriz de observación y  $K_k$  es la matriz de ganancia de Kalman.

La matriz  $A$  decide como el estado previo  $\hat{x}_{k-1|k-1}$  es manipulado en la predicción actual,  $\hat{x}_{k|k-1}$ . La matriz  $B$  determina como la señal de control,  $u$ , se incluye en el sistema, y  $C$  decide cómo los estados afectan a la señal de medida,  $y$ .

Como se muestra en el algoritmo recursivo, el filtro Kalman predice el valor de estado en el paso  $k$  basado en los resultados del paso  $k-1$ , después calcula la matriz de ganancia.

La predicción se actualizará tras obtener las mediciones, momento en el que se obtienen los valores de estimación en paso k. Por último, se calcula el error de estimación de covarianza. Se podrían describir estos dos pasos como predicción y corrección. Para mayor claridad, se adjunta la tabla 2:

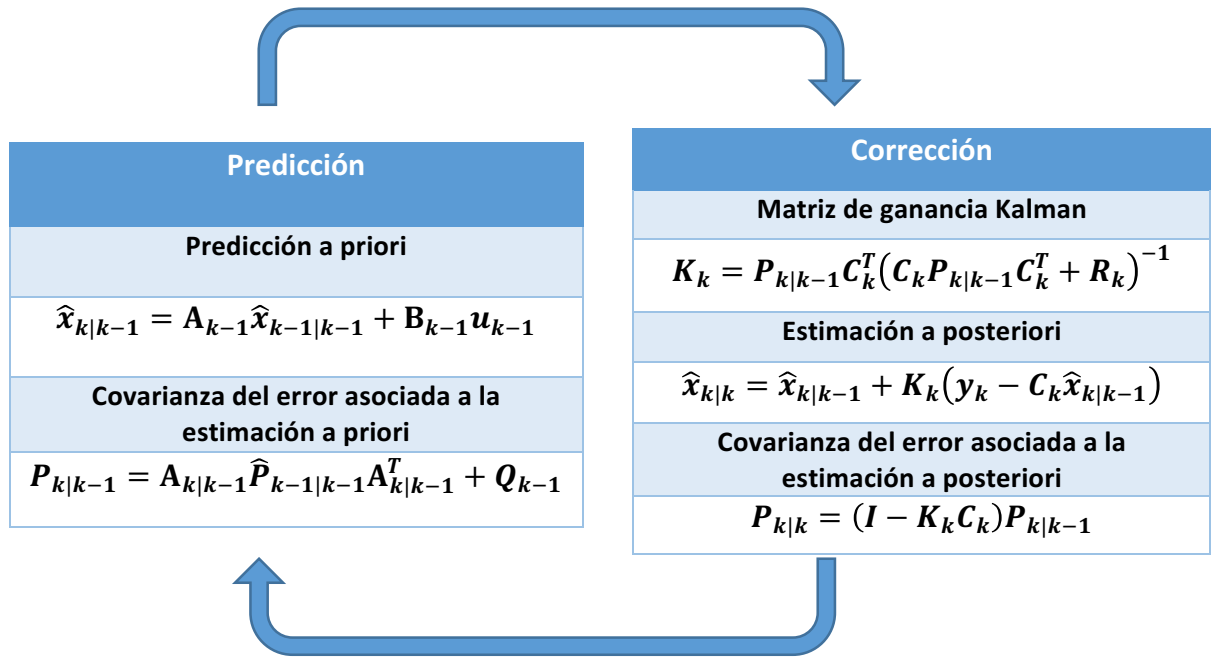


Tabla 2. Visión esquemática del funcionamiento del filtro Kalman

En general, las matrices  $Q_k$  y  $R_k$  son constantes, pasando a ser llamadas simplemente  $Q$  y  $R$ , respectivamente. La elección del valor asignado a estas dos matrices representa un compromiso entre la velocidad de cálculo del filtro y su sensibilidad al ruido. Un valor alto  $Q$  se corresponde con mucho ruido de proceso, se emplea cuando es necesario aportar valor a la señal de medida,  $y$ . Sin embargo, de esta manera el ruido se ve amplificado, un claro inconveniente. Este cambio resulta en un filtro muy reactivo a cambios en las medidas, necesario en ocasiones. Por otro lado, si la matriz  $R$  es muy grande, el ruido no es amplificado pero el filtro será poco reactivo y cambiará lentamente frente a cambios en las mediciones.

Es importante recordar que el compromiso entre un filtro veloz y sensible al ruido y un filtro robusto y que converge lentamente se debe ajustar al sistema individual que se está estudiando[23].

Más adelante se explica en profundidad cómo se aplica el filtro Kalman en este trabajo y cómo se han modelado las distintas partes para la obtención de resultados reales y útiles.

## Capítulo 3

# APROXIMACIÓN EXPERIMENTAL



# Índice Capítulo 3

## Aproximación experimental

3. Aproximación experimental	42
3.1 Objetivos	42
3.2 Registro de datos	43
3.2.1 Datos requeridos	43
3.2.2 Instrumentos de medida	44
3.2.2.1 Hardware utilizado	44
3.2.2.2 Software utilizado	46
3.2.3 Adquisición de datos	48
3.2.4 Condiciones de adquisición de datos	49
3.2.5 Alternativas y argumentos	50
3.2.6 Análisis de los datos	52
3.3 Ensayos para el registro de datos	55
3.3.1 Vehículo de pruebas	55
3.3.1.1 Radio efectivo del Hyundai i30	57
3.3.1.2 Información OBD II del Hyundai i30	59
3.3.2 Ensayos requeridos	60
3.3.2.1 Ensayos en superficie plana	61
3.3.2.2 Ensayos en pendiente	62
	30

## 3 Aproximación experimental

En este capítulo se describen los distintos pasos de la realización del experimento. Entre otros, se exponen los objetivos del experimento y se explica qué datos es necesario registrar, bajo qué condiciones se leen y cómo se analizan una vez recogidos. Es importante describir estas condiciones para facilitar la obtención de resultados satisfactorios. Se pretende controlar todos los aspectos relevantes para el proyecto y comprobar la validez en el mayor número de condiciones distintas, para verificar la versatilidad y robustez de los resultados.

### 3.1 Objetivos

En esta sección se describe brevemente el objetivo principal que justifica la realización del experimento. El objetivo principal del experimento es obtener un estimador que funcione correctamente en multitud de condiciones. Se buscan resultados rápidos, fiables y, sobre todo, precisos.

El diseño del algoritmo se centra en recoger los datos referentes a velocidad real (vía GPS), velocidades de rotación de las ruedas y dirección (a través de OBD II) y una medida de acelerómetro dispuesto en el eje longitudinal para emplear estos datos como variables de cálculo del filtro Kalman. Finalizado el cálculo, se obtienen dos resultados de estimación: la velocidad estimada y la pendiente de calzada estimada por la que circula el vehículo. El diseño ideado para el algoritmo se puede observar en la figura 9.

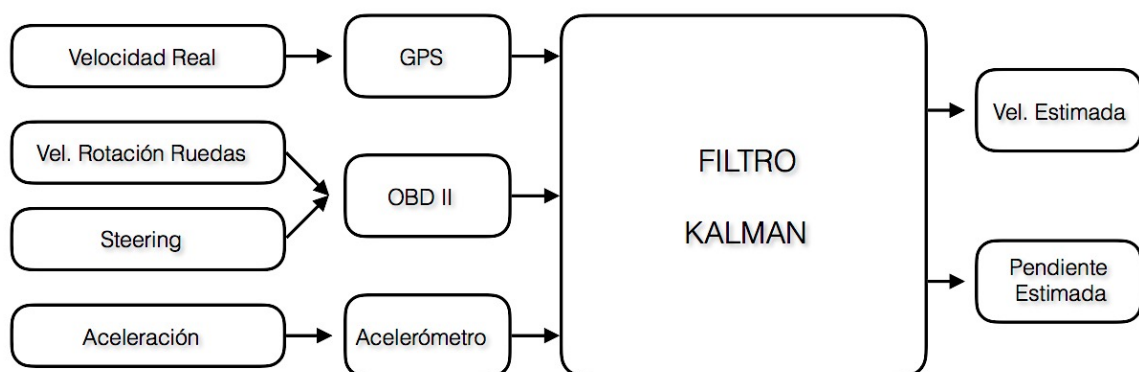


Figura 9. Plano del algoritmo diseñado

## 3.2 Registro de datos

En esta sección se exponen el método de trabajo seguido para la obtención de datos. Se describen y comentan los distintos aspectos del experimento que están relacionados con esta tarea. Esta sección argumenta qué datos es necesario recoger, cómo se registran, con qué instrumentos se obtienen y cómo se procesan. También se recoge una serie de alternativas a lo propuesto.

Por último, se explica el método de análisis seguido con los datos obtenidos para que el finalmente la estimación funcione. Se discute el proceso seguido y se aporta un esquema del método a modo de resumen.

### 3.2.1 Datos requeridos

Las estimaciones se basan en datos obtenidos a partir de sensores del vehículo. Estos sensores envían las señales que se pueden relacionar con distintos estados del vehículo y estimar esa situación.

Para la estimación de nuestro trabajo, será necesario identificar, leer y registrar sincronizadamente una serie de datos.

Los datos necesarios a recoger durante los ensayos se dividen en dos grupos. El primer grupo lo forman los datos que se obtienen a partir de OBD II, es decir, son los datos de los que dispone el vehículo de por sí y se utilizan para las estimaciones. El segundo grupo son datos que no están integrados en los sensores del vehículo y precisan de su inclusión en el experimento para poder realizar las estimaciones.

Los datos a recoger a través de OBD II son:

- **Velocidad de las ruedas (rad/s):** Es el valor del que parten las estimaciones de este proyecto. La velocidad de rotación indica la velocidad lineal de cada rueda, y a partir de ahí se realizan las distintas estimaciones.
- **Velocidad longitudinal del vehículo (km/h):** Para poder verificar la precisión del valor devuelto por el coche, se utiliza este valor. Es el valor en Km/h que se le facilita al conductor desde el ordenador de a bordo.
- **Posición de giro de volante (Steering):** El ensayo se realiza en línea recta, pero para ello se ha decidido incluir también los datos de la posición del volante para verificar este estado. El dato es devuelto en grados.

Los datos a recoger fuera de OBD II son:

- **Velocidad longitudinal real:** Para contrastar la precisión con la velocidad longitudinal estimada y la velocidad que indica el ordenador de a bordo.

- **Aceleración longitudinal ( $m/s^2$ ):** Este dato de aceleración permite relacionar la velocidad con la pendiente de la calzada por la que circula el vehículo.
- **Pendiente real de la calzada (grados):** Se recoge mediante un inclinómetro, para poder verificar la veracidad de las estimaciones y la precisión que ofrecen.

### 3.2.2 Instrumentos de medida

En esta sección se recoge la información referente a instrumentos de medida empleados para la realización del experimento. Se distinguen dos grandes grupos, componentes físicos (hardware) y programas informáticos (software). De cada integrante de los instrumentos, se describe la utilidad y función deseadas y se argumenta la necesidad de incluirlo en el proyecto. Además, se proponen elementos alternativos y se razona la elección de cada integrante de esta sección.

#### 3.2.2.1 Hardware utilizado

En esta sección se introduce qué componentes físicos han sido utilizados para el estudio. Se describe brevemente el componente, la función buscada y los argumentos para su elección.

##### **Ordenador portátil**

Partiendo de la base de que es absolutamente necesario utilizar un ordenador para la realización de este proyecto, al menos en esta configuración, se tienen en cuenta algunos aspectos. Por un lado, la razón de ser un ordenador portátil y no sobremesa es imprescindible por el simple hecho de ser un elemento necesario en la lectura y registro de datos durante los ensayos. Un ordenador de sobremesa no podría obtener los datos de los elementos de medida sin hacer uso de tecnologías *wireless*. Un ordenador portátil ofrece una solución simple, efectiva y sobre todo más robusta en cuanto a recepción de datos.

El cálculo de las estimaciones también se realiza en ordenadores. En un trabajo futuro sería interesante obtener las estimaciones en tiempo real, sin embargo, este proyecto no se centra en esta implementación. Se podría utilizar un ordenador sobremesa para realizar dichos cálculos de las estimaciones, pero utilizar dos ordenadores aumenta notablemente el coste de realización de este estudio.

Por ello, entendiendo como imprescindible el ordenador portátil para este trabajo, se encuentra el segundo aspecto a tener en cuenta; el ordenador

seleccionado debe ofrecer prestaciones suficientes para manejar correctamente los programas de recogida y cálculo.

En resumen, el tipo de ordenador idóneo para este proyecto es un portátil suficientemente capaz de ejecutar el software seleccionado tanto en el apartado gráfico como en el poder de computación y cálculo (se sobreentiende que el sistema operativo de dicho portátil ofrece soporte para el software seleccionado).

### **Adaptador CAN-USB Lawicel**

Este adaptador se requiere para acceder a los datos internos del coche, a través del puerto OBD II. Sin él no será posible guardar los datos y obtener con ello las tramas internas del vehículo.



Figura 10. Adaptador CAN-USB Lawicel

Existen numerosos productos semejantes al utilizado en este proyecto en el mercado, desde aparatos propios que se enchufan al puerto OBD-II y autodiagnostican el vehículo hasta adaptadores que envían las señales vía *bluetooth*. Para este proyecto, se requiere que los datos solicitados a través del puerto sean registrados y guardados en ficheros en un ordenador, por lo que los dispositivos de autodiagnóstico no son útiles en este aspecto. Por otro lado, es necesario obtener una lectura de datos fiable y con la mayor tasa de muestreo posible. Debido a esto, el adaptador más indicado para este trabajo será un adaptador CAN a puerto USB de cable.

### **Racelogic VBOX**

Racelogic diseña y produce sistemas electrónicos para medir, registrar, analizar y simular datos de vehículos en marcha. El “kit” VBOX supone el buque insignia de su gama de productos y se ha convertido en el estándar de la industria en medición de velocidad, posición, distancia y aceleración [28].

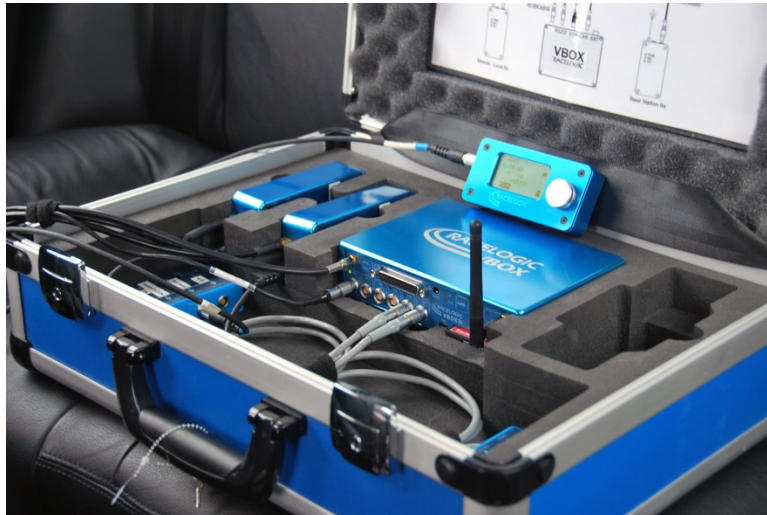


Figura 11. Maletín con algunos de los componentes de Racelogic.

El kit empleado para este proyecto se compone por una centralita (Vbox 3i), un acelerómetro (Racelogic lo denomina IMU, *Inertial Measurement Unit*), Sensor GLONASS/GPS y los cables necesarios para conectar todos los componentes.

El producto ofrecido por Racelogic es altamente sofisticado, permite realizar mediciones de gran precisión y se puede utilizar en numerosas aplicaciones, lo que justifica en parte su alto coste. Para este experimento se podrían haber utilizado centralitas de menor coste (y calidad), sin embargo, el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III dispone de estos componentes y afortunadamente se pudieron emplear para este proyecto, garantizando mediciones precisas y fiables.

### 3.2.2.2 Software utilizado

Al igual que en la sección anterior, se describen aquí algunas de las herramientas que posibilitan la ejecución de este trabajo, en este caso, se habla de software empleado. A continuación se enumeran los distintos programas informáticos que se utilizan.

#### **Microsoft Visual Studio**

Este software es un entorno de desarrollo integrado para sistemas operativos Windows. En este caso, se emplea para desarrollar el código para acceder a los datos de CAN (se programa en lenguaje C-Sharp). Gracias a este programa se obtienen las tramas del vehículo

La función deseada es disponer de un entorno de desarrollo que facilite el acceso, lectura y registro de los datos ofrecidos por el bus CAN. Se selecciona

este programa por estar disponible su licencia como alumno de la Universidad Carlos III y cumplir con el uso destinado sin problemas, aunque existen numerosos entornos de desarrollo que pueden desempeñar la misma función.

### VBOX Suite

Este software está incluido con el VBOX, y permite configurar los componentes para realizar las mediciones. Su función es leer, mostrar y registrar en tiempo real los datos necesarios para los ensayos en pista de pruebas.

Es un software potente que está optimizado para funcionar con el resto de componentes de Racelogic. Una vez llegado al punto de realizar ensayos en pista de pruebas se configuran los canales estudiados (a través de la opción "Set-up") y se conecta el resto de componentes externos. Además, es necesario indicar al programa cuándo ha de iniciar el registro de datos para evitar el llenado del *buffer*. Esto se consigue mediante la función "Report generator".

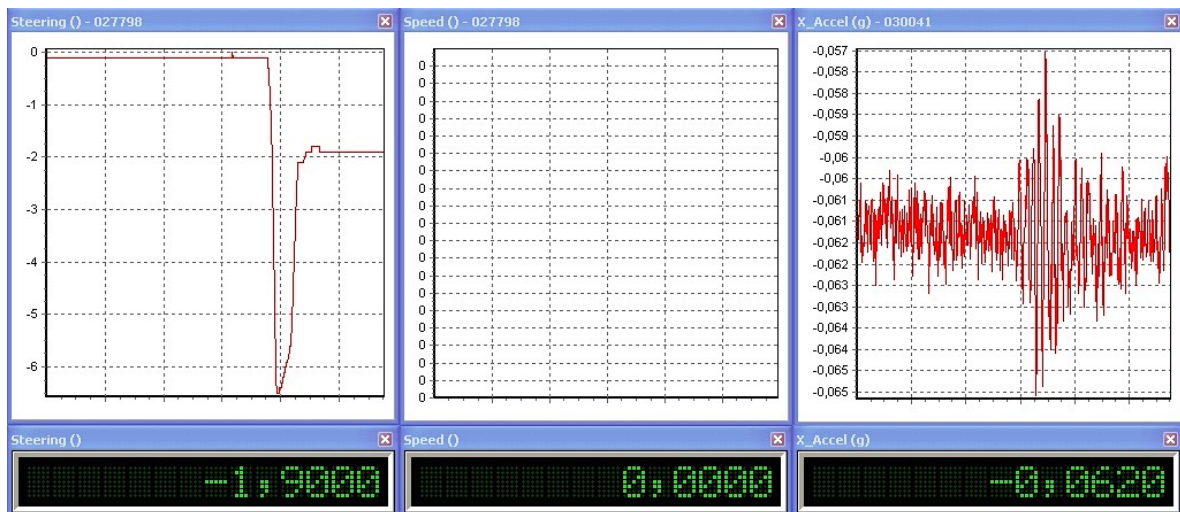


Figura 12. Captura de pantalla del software VBOX, una vez configurado. Se muestran en tiempo real la posición del volante, la velocidad longitudinal y la medida del acelerómetro.

Como es imaginable, este programa cumple con la función deseada, lo cual es ventajoso, ya que no existe una alternativa "plug-in" para controlar los dispositivos de Racelogic.

### Matlab

La licencia de este programa también es accesible como estudiante de la Universidad Carlos III. Su nombre representa la abreviación de MATrix-

LABoratory (laboratorio de matrices, en español). Se trata de otro entorno de desarrollo integrado (IDE), pero utiliza un lenguaje propio (lenguaje M).

Matlab es una herramienta matemática altamente sofisticada. Para este proyecto es de gran utilidad puesto que permite el procesado de datos y la iteración del filtro Kalman. Entre sus ventajas se encuentran la manipulación de matrices, la iteración de algoritmos y la representación de datos y funciones, entre otros.

No se trata de un software imprescindible, puesto que se puede programar el filtro Kalman en numerosos lenguajes y softwares distintos. Sin embargo, desempeña su uso destinado sin problemas y su utilización en la industria es amplia, por lo que supone una opción a tener en cuenta.

## Microsoft Office

La suite ofimática de Microsoft se utiliza en este trabajo sobre todo para encontrar las tramas de datos CAN y la redacción de la memoria.

Tras registrar la información ofrecida por el puerto OBD II es necesario encontrar las tramas del vehículo. Para facilitar este proceso, un software de hoja de cálculo con función de filtrado puede servir. En este caso, se utiliza Microsoft Excel, que ofrece estas funciones y permite encontrar los canales buscados de manera fácil y eficiente.

### 3.2.3 Adquisición de datos

Se explica a continuación cómo se recogen los datos para los ensayos. Una vez enumerados los datos necesarios para el estimador, es necesario leer y registrarlos de manera correcta.

Se requiere que los datos se registren de modo que pueden ser revisados y procesados de manera clara y precisa. También es necesario que se archiven en un formato en el que el filtro Kalman luego sea capaz de calcular. Sin embargo, el factor más importante del registro de datos de este ensayo es que estén sincronizados. De nada sirve obtener esta serie de datos cuando para este estimador dinámico es necesario relacionar varios datos con su lugar de suceso en el tiempo.

Para poder garantizar esta sincronización se utiliza un solo programa informático con todos los componentes involucrados conectados al ordenador, el programa VBOX, descrito en la sección anterior.

Una vez establecida la conexión, se registran los datos durante los ensayos de manera que queden sincronizados.



A través del Racelogic Vbox se realiza la siguiente conexión:

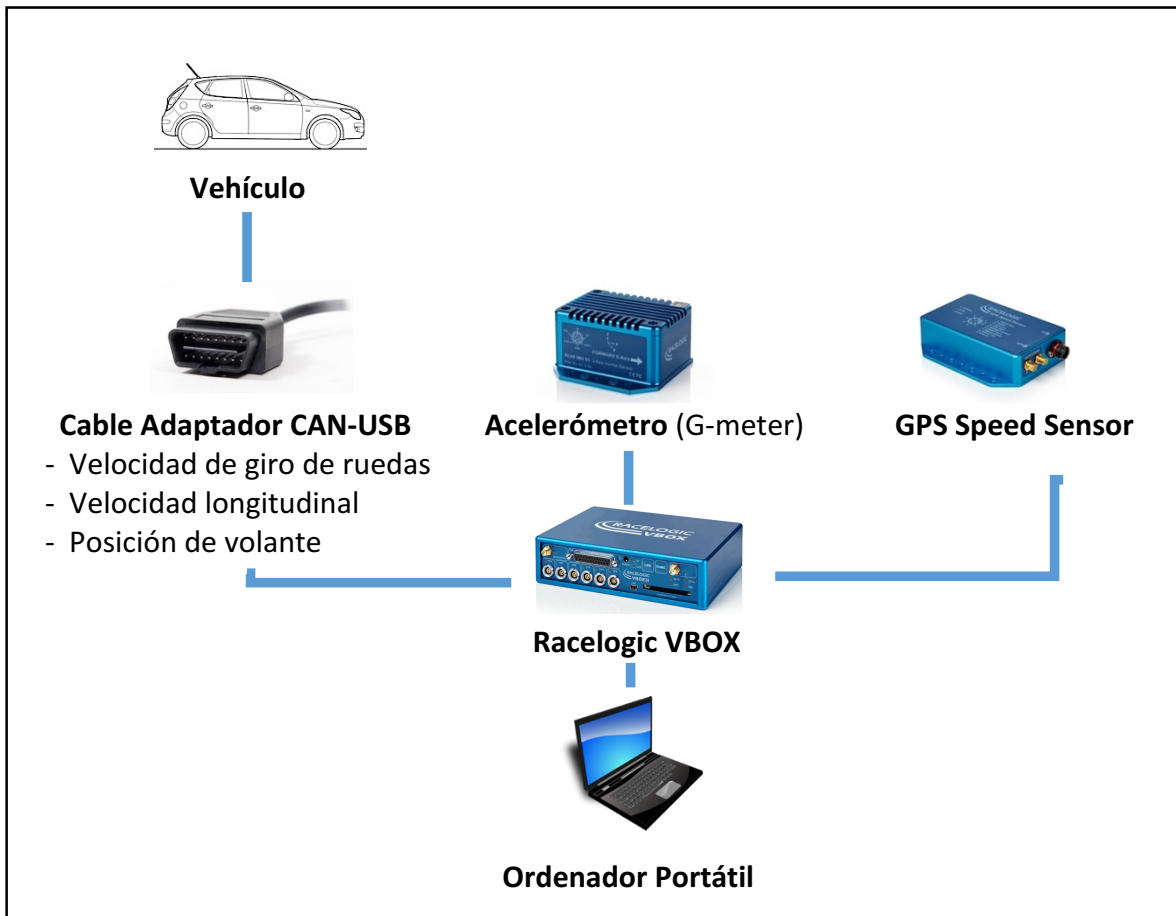


Figura 13. Disposición de componentes utilizados para los ensayos

El acelerómetro debe instalarse con la mayor cercanía posible al centro de gravedad del vehículo. Para simplificar la instalación, se decide fijar en la consola central, en el reposabrazos. Se puede asumir que el centro de gravedad del vehículo queda en torno a la ubicación del freno de mano y el reposabrazos, por lo que la instalación en esta posición supone una simplificación asumible que no debería afectar en demasía el resultado de la estimación [29].

### 3.2.4 Condiciones de adquisición de datos

En esta sección se recoge la información referente a las condiciones de adquisición de datos. Para recoger los datos, se realizan dos pistas de prueba. Una en llano y otra en pendiente. Ambos tipos de ensayo se realizan en condiciones de tracción e intentando maximizar la rigurosidad del ensayo.

Para ello, se realizan los dos tipos de ensayo aproximadamente bajo las mismas condiciones atmosféricas (temperatura, humedad, etc) al realizarse durante la misma hora del día.

El pavimento de la superficie es relativamente liso, tiene rugosidad pero se asume como suficientemente liso y que ofrece amplia tracción para realizar los ensayos.

Los componentes del automóvil están en el mismo estado para ambos ensayos, la presión de los neumáticos es la misma. La variación de nivel de combustible es despreciable entre los dos ensayos, y se realiza con el mismo personal a bordo y el mismo equipo de apoyo, por lo que se asume que el peso del vehículo es el mismo durante ambos tipos de ensayo.

En el ensayo en llano, se recorrerá una pista de pendiente 0º en la que se acelerará de manera relativamente constante hasta que haya que frenar de la misma manera en la que se ha acelerado.

En el ensayo en rampa, se utilizará una rampa, cuya pendiente se medirá mediante el inclinómetro. El ensayo se realizará de la misma manera que en llano, a excepción de llevar una velocidad más baja, por condiciones de la pista.

En la sección 3.3 se describe con mayor profundidad la información referente a los ensayos así como la descripción y argumentación de cada uno de ellos

### 3.2.5 Alternativas y argumentos

A continuación se exponen las distintas alternativas posibles a la realización de este proyecto y los argumentos empleados para justificar la ejecución seleccionada.

En cuanto al estimador, se consultaron varias opciones de filtrado de datos, como por ejemplo los filtros de Hodrick-Prescott y el de Baxter-King, herramientas útiles para la extracción de ciclos y tendencias. La ventaja del filtro de Kalman es que, al ser un método recursivo, emplea toda la historia de la serie de datos pero con la diferencia de intentar estimar una trayectoria estocástica de los coeficientes, en vez de manera determinística. Debido a esto, se reduce el riesgo de error ante la presencia de cambios estructurales.

El filtro Kalman se distingue por su capacidad de predecir un estado incluso cuando la naturaleza del sistema modelado es desconocida y ser una herramienta ligera en cuanto a carga de cálculo, un factor necesario en este trabajo. Entre las desventajas de este estimador, se puede enumerar que sólo es necesario introducir un valor de media y varianza de los datos de estado para iniciar el algoritmo. Por otro lado, su empleo supone un conocimiento avanzado de estadística y probabilidad, lo que puede dificultar su aplicación. Por último, añadir que, como todos los métodos regresivos, los resultados están condicionados por la información pasada de la variable estudiada.

Sin embargo, es un filtro que cumple con los requerimientos establecidos, es un método de estimación eficiente, preciso, sin exceso de ruido en la señal y robusto. Por ello, se trata de un buen método de estimación para este trabajo.

En lo que respecta a la manera de estimar la velocidad longitudinal, se encuentran varias opciones. La primera, y que mejor se ajusta a la motivación de este proyecto de utilizar sensores existentes en el vehículo y accesible desde OBD II, es emplear la señal de velocidad de giro de las ruedas. Mientras se encuentren en condiciones de tracción, cualquiera de las ruedas puede ofrecer la velocidad rotacional en un momento preciso. A través de un simple cálculo (conocido el radio del neumático) es posible obtener la velocidad lineal de cada rueda. Con esto ya es posible verter las distintas velocidades lineales en el filtro Kalman y se obtendrá la estimación. La ventaja de este método, como se ha indicado arriba, es que no supone incluir ningún componente añadido al vehículo, por lo que se maximiza la efectividad del método y se minimiza el impacto que tendría su inclusión en el coste. Sin embargo, la desventaja de este método es que el giro no se considera una rotación perfecta (esto se explica más adelante) e induce un error en la estimación de velocidad.

Además, en el momento en el que se pierda tracción, las ruedas sin tracción girarán más rápido de lo real, por lo que existirá un error significativo en la estimación. En el caso del vehículo empleado para las pruebas de este ensayo, al tratarse de un automóvil de tracción delantera, se podría asumir que las ruedas traseras siempre “siguen” el pavimento y nunca perderían tracción (en aceleración) por lo que podrían ser fuentes de datos fiables. Se decidió incluir las ruedas delanteras en el estudio para obtener más fuentes de datos y ofrecer oportunidad de realizar un estudio que relacione par en el eje motriz frente a capacidad de adherencia del vehículo. De esta manera, el algoritmo tiene en cuenta todas las fuentes de datos fiables bajo tracción.

Es necesario advertir que un error pequeño en la medición de velocidad rotacional impactará en gran medida la estimación de velocidad. Para corregir este error se propone el uso de una antena de posicionamiento por satélite GPS que mostrará un dato de velocidad longitudinal muy preciso y totalmente inconexo con las condiciones de adherencia y tracción. Una antena GPS permitiría ofrecer el dato de velocidad sin tener en cuenta condiciones de carretera por lo que supone una gran ventaja. Sin embargo, ofrece varios inconvenientes. En primer lugar, la mayoría de vehículos no llevan instalada una antena GPS, por lo que para ampliar el espectro del estudio, se decide asumir que el vehículo no tendrá antena GPS incluida. Esto implicaría tener que instalar un componente auxiliar. Por otro lado, la señal GPS, pese a ser muy precisa, puede sufrir interferencias con la proximidad de grandes construcciones, como edificios. Por ello, la antena GPS realmente sólo ofrece una fuente fiable de datos en zonas en las que no se encuentren edificios altos, arbolado u otros objetos que puedan interferir en la señal.

Una tercera manera de obtener el dato de velocidad longitudinal, es utilizar directamente el valor que ofrece el puerto OBD II. Es el dato que emplea el tacómetro del vehículo para informar al conductor. Es un método bastante conveniente, puesto que el propio vehículo ya realiza su propio cálculo de velocidad sin necesidad de añadir

componentes. Sin embargo, cuando el vehículo pierde tracción, se produce una gran diferencia entre la velocidad a la que el vehículo entiende que circula frente a la velocidad real. Esto puede resultar peligroso, al ofrecer a los sistemas de seguridad una situación del estado del vehículo que no es correcta.

La razón de emplear un acelerómetro es necesaria para poder descomponer la aceleración longitudinal y el efecto de la gravedad. Incluso teniendo instalada una antena GPS, no sería posible disociar estos dos parámetros de otra manera. Es por ello que la instalación de un acelerómetro es necesaria para realizar la estimación de pendiente.

### 3.2.6 Análisis de los datos

En esta sección se explica cómo se analizan los datos recogidos durante los ensayos. En un caso ideal, la información de velocidad longitudinal y pendiente de calzada serían calculados en tiempo real para ofrecer la información tanto al conductor como a los sistemas de seguridad para aprovecharla. El objetivo final de este trabajo es ofrecer a estos sistemas una dimensión adicional de información acerca del vehículo para obtener una visión más clara del estado vehicular.

Sin embargo, para simplificar el proyecto, se han realizado por separado los ensayos y el análisis de los datos recogidos. Puesto que de otra manera habría implicado instalar más componentes en el vehículo, los resultados de la estimación se han obtenido después de realizar los ensayos y sirven para verificar la pendiente que se ha afrontado, en vez de ser un dato en tiempo real.

Se comenta más adelante en futuras líneas de trabajo la implementación de esta información en tiempo real.

Los datos recogidos durante los ensayos se obtienen desde el software propio de VBOX. La configuración de VBOX, los canales deseados y el montaje necesario se explican en detalle en la sección 3.2.4. Estos datos, que se guardan automáticamente en el formato VBOX, no vienen en unidades del Sistema Internacional y pueden contener errores surgidos durante los ensayos. Por lo tanto, el siguiente paso es formatear estos registros a otro formato más universal, de manera otros programas puedan acceder a ellos, no solo VBOX. Desde el “Report Generator” de VBOX se formatean los datos a formato de libro de texto (.txt).

Al haber formateado los registros bajo esta extensión, es posible abrirlo con multitud de programas. Para encontrar y reparar los errores que puedan haber surgido, se abre el archivo desde Microsoft Excel. Es posible que durante los ensayos se llene el buffer de datos y se corrompa el dato de tiempo del experimento. Estos errores de *timing* también se dan en ocasiones al iniciar el registro de datos, en los que el primer valor y/o el último de tiempo están incompletos o indicando un tiempo erróneo. Afortunadamente, estos

fallos en el registro se subsanan fácilmente puesto que el dato de tiempo sigue un orden cronológico.

El siguiente paso es calibrar la lectura del acelerómetro. En un caso ideal, este irá montado perfectamente plano y muy cerca del centro de gravedad del vehículo. En caso de tener que montarse ligeramente inclinado, el acelerómetro dará un valor medido cuando el vehículo está parado. Para calibrar el acelerómetro, se procesará este valor medido inicial para dejarlo como cero, de manera que la inclinación del acelerómetro se puede sacar de la ecuación y la medida, en parado, sea cero.

El siguiente proceso a realizar es efectuar el cambio de unidades. Los componentes de VBOX leen en unidades distintas al Sistema Internacional. Lo mismo pasa con el dato de velocidad obtenido por el puerto OBD II. Se aprovecha tener abierto el registro en excel para realizar los siguientes cambios de unidades:

- **Tiempo:** el dato de tiempo no es necesario modificarlo, puesto que ya viene en segundos.
- **Aceleración:** el acelerómetro de Racelogic registra los valores obtenidos en función de g. 1g equivale a una medida de una vez la gravedad estándar en la Tierra (se considera  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ). Por lo tanto, para efectuar el cambio de unidades se realiza la siguiente operación:

$$\text{aceleración } \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) = 9,81 \left( \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) * \text{aceleración } (g) \quad \text{Ec. 4}$$

- **Velocidad:** el dato de velocidad obtenido de OBD II viene dado en km/h. Para convertirlo al Sistema Internacional, se opera de la siguiente manera:

$$\text{vel. } \left( \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = \frac{1000 \text{ (m)}}{1 \text{ (km)}} * \frac{1 \text{ (h)}}{3600 \text{ (s)}} * \text{vel. } \left( \frac{\text{km}}{\text{h}} \right) \quad \text{Ec. 5}$$

Con esto, los datos quedarían en las unidades correctas y con cualquier posible error de timing filtrado y reparado. Antes de cerrar Microsoft Excel se guarda bajo la extensión "Texto delimitado por tabulaciones" (también .txt). De esta manera los datos quedan guardados en columnas delimitadas por tabulaciones. Una vez que se han calibrado, filtrado, reparado y convertido los datos, es el momento de adaptar los registros a Matlab para que el estimador sea capaz de procesarlos. Para ello, se abren en un procesador de textos. A través de la función "Reemplazar" se buscan y sustituyen todas las comas del texto por puntos, respectivamente (Matlab trabaja en formato anglosajón de puntuación de cifras en vez de utilizar comas para indicar la presencia de decimales). En este punto, los datos ya están listos para ser leídos por Matlab. Sin embargo, es necesario verificar que el programa que se ha diseñado abre correctamente el archivo deseado y es capaz de leer los parámetros que figuran en él. Cuando se verifica esto, el documento ya está listo para entrar al estimador.

Es importante realizar todas estas tareas y verificarlas, puesto que unos datos incorrectos, erróneos, incompletos o no calibrados supondrían una estimación errónea, y un pequeño error de dato puede resultar en un gran error de estimación. El estimador se ha configurado previamente en Matlab con los parámetros de diseño deseados. Es en este instante en el que se inicializa la iteración y se obtienen los resultados. Se diseña el programa para generar varias gráficas con los resultados. Entre ellas, una gráfica que compara la velocidad real frente a la estimada, y otra gráfica que muestra la estimación de la pendiente.

A continuación se muestra una visión esquemática del método de análisis.

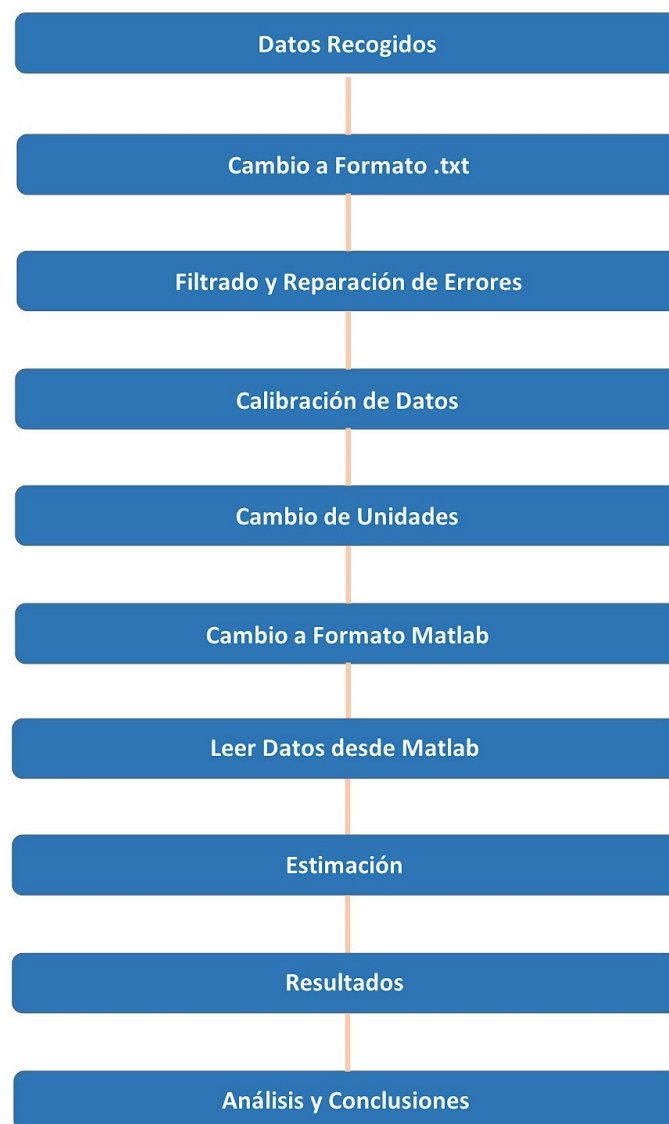


Figura 14. Método de análisis

### 3.3 Ensayos para el registro de datos

En esta sección se encuentra la información correspondiente a los ensayos, su realización y su argumentación.

En primer lugar, se propone un vehículo de pruebas, así como las razones de su empleo y la utilidad de cara al experimento. Establecido el modelo de vehículo sobre el que realizar el experimento, se calculan algunos parámetros específicos relevantes para el trabajo. A su vez, se describe la información obtenida a través de OBD II para dicho modelo de vehículo.

A continuación, se describen los ensayos necesarios. Para probar la versatilidad y robustez del estimador, se somete el vehículo a varias situaciones distintas. Para ello se emplean dos pistas de pruebas. Se explican las características requeridas de las pistas de pruebas y se enumeran los ensayos que se realizan en ellas.

#### 3.3.1 Vehículo de pruebas

En esta sección se encuentran los detalles referentes al vehículo empleado para la realización de las pruebas.

Para escoger un vehículo para los ensayos, es necesario delimitar el tipo de vehículo en el que se centra el estudio y justificar su empleo. Este experimento se centra en aplicar y verificar la estimación de velocidad y pendiente en vehículos de tracción delantera, asumiendo condiciones de tracción.

Como se ha mencionado en el capítulo 1, la configuración motriz de tracción delantera representa la mayor parte del parque móvil, por varias razones. En primer lugar, por cuestiones de *packaging* el motor suele encontrarse en la parte delantera del automóvil, en general en disposición transversal. En vez de enviar la potencia a las ruedas traseras, resulta más simple dirigir la potencia al eje delantero, ya que así se evita tener que dejar espacio para el árbol de transmisión. Esto permite tener un habitáculo más espacioso. En segundo lugar, disponer el motor transversalmente y aplicar la potencia motriz al eje delantero tiene ventajas de seguridad: esta configuración tiende a deformarse mejor en caso de accidente frontal que un motor longitudinal, con lo que se reduce el riesgo de que el bloque motor invada el habitáculo en estas situaciones. En resumen, un vehículo de tracción delantera suele ser más fácil de conducir por mejor reparto de pesos, más ligero por el diseño más simple y por ello, más eficiente en condiciones de conducción normal.

Esta presencia masiva en las carreteras del mundo (al menos en España) hace que el estudio cobre relevancia, puesto que los trabajos previos centran sus esfuerzos en otras configuraciones. Por tanto, el vehículo de pruebas seleccionado debe ser de tracción delantera.

Para este experimento se ha utilizado un Hyundai i30 del año 2007 y motor 1.6 CRDi. Se trata de un turismo del segmento C (compactos), de cinco plazas, motor delantero en disposición transversal y tracción al eje delantero, por lo que encaja perfectamente con los requerimientos de este experimento.



Figura 15. Vista tres-cuartos frontal del vehículo de pruebas



Figura 16. Otras vistas del Hyundai i30 utilizado para la realización de este trabajo.

Se ofrece a continuación una tabla con algunos de los aspectos más relevantes para el trabajo de este automóvil:

Masa total	1266 (Kg)
Potencia	115/86 (Cv/KW)
Aceleración 0-100	11,6 (s)
Velocidad máxima	188 (km/h)

Tabla 3. Ficha técnica reducida del Hyundai i30



### 3.3.1.1 Radio efectivo del Hyundai i30

El modelo de vehículo utilizado es un factor importante a tener en cuenta para el desarrollo del experimento. Uno de los factores que intervienen en este caso es el radio de la rueda, puesto que es un elemento fundamental en cálculo de velocidad longitudinal de cada rueda. Una vez conocidos la llanta y el neumático de los que hace uso el vehículo, se obtiene la velocidad lineal de las ruedas, como se explica a continuación. La velocidad de las ruedas es:

$$v = \omega r_e \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $r_e$  es el radio efectivo al circular con el vehículo y  $\omega$  la velocidad de giro de las ruedas. El radio efectivo está relacionado con la presión, desgaste y estado del neumático, el peso del vehículo, la velocidad, la aceleración y otros factores [30]. Por ello, no es un valor constante.

El radio nominal es el que viene indicado según las cifras que aparecen en el neumático. En este caso es 225/45 ZR 16. Esto significa lo siguiente:

- Anchura nominal de la sección: 225 mm
- Relación nominal de aspecto: 45%
- Neumáticos de estructura radial
- Diámetro de llanta: 17 pulgadas

Se puede obtener con ello el radio nominal:

$$r_n = \frac{\text{Diám. llanta (pulg.)}}{2} * 25,4 + \text{Ancho nominal} * \text{Rel. de aspecto} \quad \text{Ec. 7}$$

Sustituyendo:

$$r_n = \frac{17}{2} * 25,4 + 225 * 0,45 \quad \text{Ec. 8}$$

Y el resultado:

$$r_n = 317,15 \text{ mm} \quad \text{Ec. 9}$$

Este valor es el valor que indica el fabricante de las medidas del neumático. Sin embargo, como se ha indicado previamente, hay numerosos factores que influyen en este valor y para el experimento propuesto ha de tenerse en cuenta otra medida del radio [25].

Al aplicar carga al neumático, éste se deforma en relación con el peso aplicado. A este valor se le denomina radio bajo carga, y suele ser representativo del radio real de deformación sobre todo en los instantes de iniciar y detener la marcha, en la que el peso del vehículo se desplaza sobre un eje u otro y modifica el valor del radio, aunque este valor sólo se adopta por un breve instante de tiempo.

Para este proyecto, no se tratará como dato relevante el radio bajo carga, ya que no es válido como radio real una vez que el vehículo ha comenzado a rodar. En realidad, hay que tener en cuenta los microdeslizamientos producidos por la huella del neumático. Estos desplazamientos microscópicos posicionan el neumático en un estado de rodadura real, no perfecta.

Si una rueda rodase perfectamente durante 100 vueltas, se observaría que la rueda en estado real (con microdeslizamientos) habría rodado más de 100 vueltas. Al porcentaje de vueltas de más que habría rodado la rueda real se le denomina deslizamiento y se denomina  $\varepsilon$ . Este valor se asume como un valor típico en este trabajo de manera que  $\varepsilon = 0,03$  (3%) [26].

El radio efectivo sería por lo tanto:

$$r_e = (1 - \varepsilon)r_n \quad \text{Ec. 10}$$

Por lo que:

$$r_e = 307,64 \text{ mm} \quad \text{Ec. 11}$$

Este será el valor que se utilizará para poder relacionar el valor de la velocidad de giro de las ruedas con la velocidad longitudinal. Es decir:

$$v = \omega * 30,764E - 2 \quad \text{Ec. 12}$$

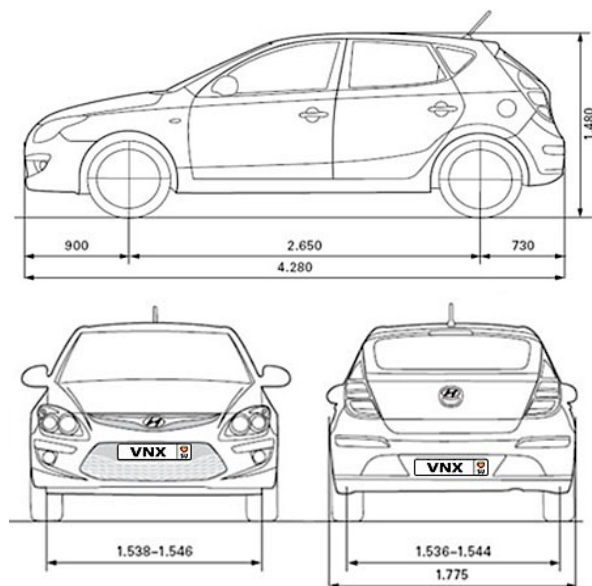


Figura 17. Dimensiones del Hyundai i30

### 3.3.1.2 Información OBD II del Hyundai i30

La información ofrecida por OBD II es distinta en cada vehículo, puesto que cada fabricante codifica su propia versión del sistema. Existen canales comunes (establecidos en el estándar OBD II), pero multitud de funciones propias son únicas a cada fabricante, y en ocasiones, a cada modelo.

Hyundai no ofrece la codificación de OBD II al público, por lo que fue necesario conseguir esta información de modo experimental. A través de CAN USB y el software de LAWICEL, fue posible obtener los datos que se registraban en OBD. Se realizaron múltiples ensayos para poder identificar los PIDs necesarios para este proyecto. Estos ensayos se basaron en simular condiciones en las que el canal deseado sería modificado, registrar los datos y filtrarlos en Microsoft Excel.

Se obtuvieron los siguientes identificadores de CAN:

Dato	PID	DLC	Bytes	Codificación	Unidades
Steering (Giro de Volante)	2B0	5	DC	DC/10	Grados
Velocidad de Giro de Volante	2B0	5	E	-	Grados/segundo
Pedal de Gas	260	8	E	-	%
Sistema de Inyección	260	8	CD	CD/4	RPM
Revoluciones por Minuto	316	8	FE	FE/4	RPM
Pedal de Freno	153	8	I	-	%
Velocidad Longitudinal	316	8	I	-	KM/H
Wheel Speeds	1F1	8	EFGHIJ	No disponible	No disponible

Tabla 4. Información obtenida a partir del puerto OBD II del Hyundai i30

Como se puede observar en la tabla 4, no ha sido posible encontrar la velocidad de las ruedas por separado para realizar este experimento, ya que los valores indicados por cada rueda se envían en codificaciones diferentes, por lo que no es posible utilizar este método para el estimador de velocidad longitudinal.

Otra alternativa sería conectar al VBOX un GPS, capaz de registrar con más precisión el dato de velocidad longitudinal. Sin embargo, la pista de pruebas concedida en la Universidad Carlos III de Madrid en el Campus de Leganés se

encuentra en una zona rodeada de edificios suficientemente grandes como para impedir el uso de GPS como alternativa para este proyecto, ya que los edificios influyen en la precisión de la señal y no permiten estudiar la velocidad longitudinal con suficiente exactitud.

Es por ello, que para este trabajo, se ha decidido emplear directamente el valor de velocidad longitudinal que se obtiene a partir de OBD II. Se trata de la misma señal que obtiene el tacómetro e indica la velocidad en el ordenador de a bordo. Para ello, simplemente se registra la velocidad de OBD II junto con los valores del acelerómetro durante los dos ensayos.

### 3.3.2 Ensayos requeridos

En esta sección se detalla la información acerca de los ensayos necesarios para el experimento, sus razones y las pistas de prueba que se han utilizado.

Durante los ensayos, se busca simular una serie de situaciones en las que el vehículo debe estimar correctamente los parámetros deseados. Para que los resultados sean útiles, se busca someter al vehículo a distintas condiciones en las que se puede encontrar cuando circula por una carretera, es decir, se pretende simular condiciones reales.

En primer lugar, es necesario comprobar que la estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada funciona correctamente. Este caso es fácilmente verificable durante ensayos en llano, puesto que la velocidad en llano es fácil de calcular y se observará cualquier posible error en la estimación de pendiente. Realizar ensayos en llano facilita comprobar la precisión de la estimación de velocidad y observar si el estimador funciona correctamente. La estimación de pendiente deseada en una pista llana sera de cero grados de inclinación. Por ello, el primer tipo de ensayo a realizar es en una superficie llana.

A continuación, el vehículo debe encontrarse en una situación en la que circula por una pendiente conocida distinta a cero grados. De esta manera, sabiendo la pendiente real se puede contrastar la precisión de la estimación. Esto resulta importante de cara a validar los resultados finales, por lo que se considera el segundo tipo de ensayo en superficie inclinada.

Es decir, se consideran dos tipos de ensayo, uno llano y otro inclinado. Lo que requiere la utilización de dos tipos de pista distintas, una en superficie plana y otra en pendiente. Para ambas pruebas se han empleado las instalaciones de la Universidad Carlos III de Madrid, en Leganés. No es posible realizar pruebas en vías públicas porque el vehículo no está matriculado ni asegurado.

Para validar los datos obtenidos, se realizan tres ensayos en cada sentido, por pista de pruebas. Es decir, en llano se realizan tres ensayos en un sentido y otros tres en el otro, para un total de seis. Asimismo, se registran los datos de tres ensayos de subida a la rampa, y otros tres de bajada. En total, se realizan doce ensayos de registro de datos.

Este proceso permite obtener una serie de datos más fiable, al aumentar la probabilidad de obtener datos correctos y evitar fallos del sistema. Un error de medición por parte del sistema podría pasar como dato fiable si no se encuentran discrepancias, pero para dar con dichas discrepancias es necesario tener una serie de datos alternativa para contrastar. Al realizar tres ensayos por cada sentido de las pistas de prueba, se obtienen dos series de datos adicionales con las que comparar cada serie.

Para cada sentido, se realizan tres ensayos con aspectos diferentes. El primer ensayo en cada sentido, simula una conducción eficiente. Se registran velocidades bajas (menores a 25 km/h) y las aceleraciones a las que el vehículo queda sometido son bajas también. El segundo ensayo intenta simular también la conducción eficiente del primer ensayo. Por último, el tercer ensayo simulará un modo de conducción agresivo. Las velocidades registradas son mucho mayores (hasta 50km/h) y por ello, las aceleraciones son mayores. Este tipo de ensayo queda más influenciado por el fenómeno de cabeceo, por lo que es interesante incluirlo.

Habiendo resumido las condiciones buscadas en todos los ensayos, se comentan a continuación las características de cada tipo de ensayo.

### 3.3.2.1 Ensayos en superficie plana

En esta sección se comentan los ensayos necesarios en llano y se propone una pista de pruebas que cumpla con los requisitos.

Como se ha descrito antes, se realizan tres ensayos en cada sentido por cada pista de pruebas. En las pruebas en llano, equivale a 3 ensayos en cada sentido para un total de 6 ensayos. La razón de realizar tantos ensayos en llano viene dada por la necesidad de ofrecer una serie de datos consistentes y coherentes, de manera que si se registra una serie de datos de manera incorrecta, las otras series de datos permitan encontrar el error.

Por otro lado, las pruebas en llano se realizan en ambos sentidos para verificar que la pista utilizada realmente es plana. Cualquier inclinación del plano, por pequeño que sea, debe aparecer en los resultados de esta manera.

Para las pruebas en llano, se emplea un espacio en línea recta del que dispone el campus, suficientemente señalizado para garantizar la seguridad de los viandantes. Cumple con los requisitos impuestos por el experimento: es llano, recto, ofrece amplia tracción y permite realizar las pruebas sin problema.



Figura 18. Pista de pruebas en llano

### 3.3.2.2 Ensayos en pendiente

En esta sección se encuentran los detalles que explican los ensayos en pendiente y la pista inclinada utilizada.

Al igual que en llano, se realizan tres ensayos por cada sentido en la pista de pruebas. Esto se traducen en 6 ensayos en total en pista inclinada. Al igual que antes, se realizan varios ensayos para ofrecer series de datos consistentes de cara iniciar la estimación.

Sin embargo, en el caso de la pista inclinada, realizar ensayos en ambos sentidos es de utilidad aumentada, puesto que supone recoger datos en dos situaciones simuladas distintas. De esta manera se obtienen datos tanto en subida de una pendiente como en bajada, lo que duplica las situaciones simuladas en pendiente y permite observar cómo se comporta el estimador en cada caso.

Para el experimento se requiere por lo tanto, una superficie inclinada, que ofrezca tracción suficiente y represente un valor de pendiente común para la mayoría de conductores.

Las pruebas en plano inclinado se realizan en la rampa de acceso al garaje subterráneo de la Universidad. Esta pista también ofrece suficiente tracción, inclinación y espacio para realizar la prueba. Sin embargo, no es en línea recta, aunque no debería afectar en demasía los resultados de la prueba, puesto que la velocidad se considera baja, es necesario recalcarlo. Además, esta rampa está dividida en dos pendientes. Las medidas con el inclinómetro indican que la primera parte tiene una pendiente media de 7 grados y la segunda una pendiente media de 7 grados también, por lo que para el experimento se asume una pendiente constante de 7 grados.



Figura 19. Pista de pruebas en superficie inclinada



Figura 20. Vistas alternativas de la rampa de acceso que se ha empleado para las pruebas en superficie inclinada.

Como se puede observar, ambas pistas de pruebas cumplen con los requisitos necesarios para la realización de las pruebas. Por ello, se consideran aptas para el experimento.

## Capítulo 4

# RESULTADOS



# Índice Capítulo 4

## Resultados

4. Resultados	66
4.1 Estimador inicial	66
4.1.1 Ecuaciones y modelo iniciales	67
4.1.1.1 Estimación de velocidad longitudinal a partir de velocidad de ruedas	67
4.1.1.2 Estimación de pendiente de calzada a partir de velocidad de ruedas	69
4.1.2 Resultados del modelo inicial	71
4.2 Estimador final	72
4.2.1 Ecuaciones y modelo finales	73
4.2.2 Simplificaciones del modelo final	75
4.3 Resultados de los ensayos	76
4.3.1 Ensayos en superficie plana	77
4.3.1.1 Ensayo en llano 1	77
4.3.1.2 Ensayo en llano 2	78
4.3.1.3 Ensayo en llano 3	79
4.3.1.4 Ensayo en llano 4	80
4.3.1.5 Ensayo en llano 5	81
4.3.1.6 Ensayo en llano 6	82
4.3.1.7 Resumen de los ensayos en llano	83
4.3.2 Ensayos en plano inclinado	84
4.3.2.1 Ensayo en rampa 1	84
4.3.2.2 Ensayo en rampa 2	85
4.3.2.3 Ensayo en rampa 3	86
4.3.2.4 Ensayo en rampa 4	87
4.3.2.5 Ensayo en rampa 5	88
4.3.2.6 Ensayo en rampa 6	89
4.3.2.7 Resumen de los ensayos en rampa	90

## 4 Resultados

En este capítulo se ofrecen los resultados obtenidos de las pruebas. El fin del proyecto es llevar a cabo la estimación de la velocidad longitudinal y de la pendiente de la calzada por la que se circula. Para ello se ha empleado un filtro Kalman, que hace uso de los datos introducidos para estimar con mínimo error los resultados deseados. Los datos en los que se basa para la estimación se han descrito anteriormente. El objetivo es realizar una estimación que cumpla con los requisitos (rápida, eficiente, robusta y robusta, entre otros.)

En primer lugar se describen los modelos aplicados para el filtro y los resultados obtenidos en cada caso. A su vez, se encuentra una sección de simplificaciones realizadas para este estudio. El capítulo concluye con un resumen detallado de los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, tanto en llano como en pendiente.

A la hora de realizar el análisis se comparan dos casos diferentes. El primer caso, es la estimación para un ensayo en superficie plana. El segundo, se realiza en una rampa o plano inclinado. Como se ha indicado en el capítulo anterior, se realiza un total de doce ensayos en las pistas de prueba.

Con el fin de obtener los resultados más exactos se optimiza el diseño y posteriormente se verifica su validez.

### 4.1 Estimador inicial

El primer modelo seleccionado para aplicar el estimador es el modelo propuesto por Yunlong Gao en [2]. Se trata de un estimador de velocidad longitudinal y pendiente de calzada a través de filtro Kalman en vehículos eléctricos e híbridos. Esta publicación detalla un avanzado modelo de estimación y, a diferencia del modelo estudiado en esta memoria, sí considera los fenómenos de pérdida de adherencia, al realizar ensayos en pista de pruebas de baja tracción (hielo y nieve).

Pese a tratar con vehículos eléctricos e híbridos, en todo caso de tracción a las cuatro ruedas, el estudio de Yunlong Gao se centra en turismos, al igual que este proyecto. Se considera parecida la dinámica vehicular de los turismos eléctricos y los turismos de tracción delantera, por lo que este parecido en modelos ha facilitado que este trabajo se considere como modelo principal a replicar.

En la siguiente sección se encuentran detalladas las ecuaciones del modelo que ha aplicado Yunlong Gao.

### 4.1.1 Ecuaciones y modelo iniciales

En esta sección se describe el modelo propuesto por Yunlong Gao, tanto para estimar la velocidad longitudinal como para la estimación de pendiente de calzada. El hecho de utilizar dos estimadores porque al tener en cuenta la pérdida de adherencia, la estimación de pendiente cometería un error significativo en estas situaciones, por lo que se decidió disociar la estimación en su modelo.

#### 4.1.1.1 Estimación de velocidad longitudinal a partir de velocidad de ruedas

Para estimar la velocidad, se usará como variable de estado la velocidad longitudinal. Las variables de observación serán las cuatro velocidades de rueda y se utilizará como input la aceleración longitudinal del vehículo:

$$\begin{aligned}x_k &= v_x \\y_k &= [v_{di} \ v_{dd} \ v_{ti} \ v_{td}]^T \\u &= a_x\end{aligned}\tag{Ec. 13}$$

Donde  $v_x$  es la velocidad longitudinal,  $v_{di} \ v_{dd} \ v_{ti} \ v_{td}$  son las velocidades de giro de las ruedas delantera izquierda, delantera trasera, trasera izquierda y trasera derecha, respectivamente.  $a_x$  es la aceleración longitudinal del vehículo.

Asumiendo que el vehículo circula en línea recta, la ecuación de estado se puede enunciar como:

$$\dot{x} = u + w\tag{Ec. 14}$$

La ecuación de observación es:

$$y = Cx + v\tag{Ec. 15}$$

Con:

$$C = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T\tag{Ec. 16}$$

Es decir:

$$\begin{aligned}x_k &= x_{k-1} + \tau u_k + w_k \\y_k &= Cx_k + v_k\end{aligned}\tag{Ec. 17}$$

Donde  $\tau$  representa el tiempo de muestreo del sistema. Para completar el filtro Kalman, se asumen los siguientes valores:

$$\begin{aligned}A &= 1 \\B &= \tau\end{aligned}\tag{Ec. 18}$$

Se completa de esta manera el filtro Kalman, que queda de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 \hat{x}_{k|k-1} &= \hat{x}_{k-1|k-1} + \tau a_{x,k-1} \\
 P_{k|k-1} &= \hat{P}_{k-1|k-1} + Q \\
 K_k &= P_{k|k-1} C^T (C P_{k|k-1} C^T + R)^{-1} \\
 \hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}) \\
 P_{k|k} &= (I - K_k C) P_{k|k-1}
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 19}$$

Las matrices de covarianza Q y R son constantes en este caso. Debido a esto, la matriz de ganancia de Kalman K también convergirá a un valor constante después de un tiempo. Puesto que el valor de K se decide a partir de las matrices Q y R, el valor de la estimación dependerá de ellos. Con el fin de obtener resultados satisfactorios, es necesario decidir el valor asignado a las matrices de covarianza.

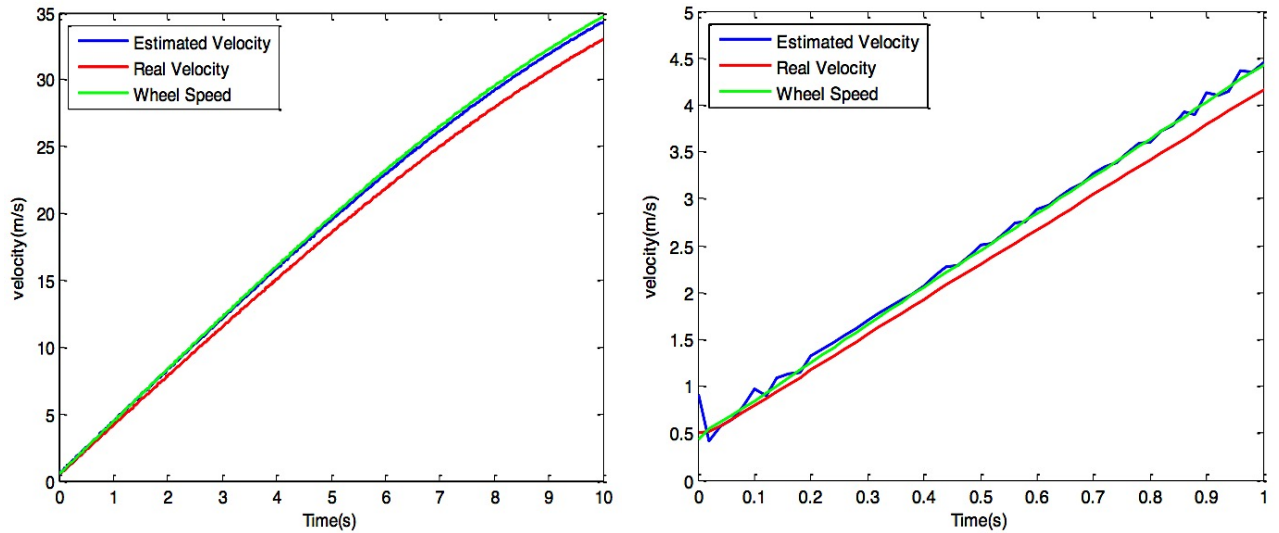


Figura 21. Simulaciones bajo distintas matrices de covarianza propuestas por Yunlong Gao [2]. Se observa la importancia de Q y R al muestrear la estimación.

Las matrices de covarianza se obtienen del trabajo previamente realizado por Yunlong Gao [2]. Se acepta como valores de matriz los siguientes:

$$R = \begin{pmatrix} 500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 500 \end{pmatrix}
 \tag{Ec. 20}$$

$$Q = \begin{pmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 100 \end{pmatrix}$$

Ec. 21

Con estos valores, los resultados de estimación son más continuos y estables, sin embargo, tienden hacia la velocidad de las ruedas (como se muestra en la figura 10). Es necesario calibrar el radio de las ruedas con los datos obtenidos en 3.3.1.

#### 4.1.1.2 Estimación de pendiente de calzada a partir de velocidad de ruedas

Para esta estimación será necesario incluir los datos del acelerómetro. En general, la medida del acelerómetro estará compuesta por la aceleración del movimiento y por la aceleración de la gravedad. Para descomponer estas dos componentes, es necesario incluir el dato de velocidad longitudinal.

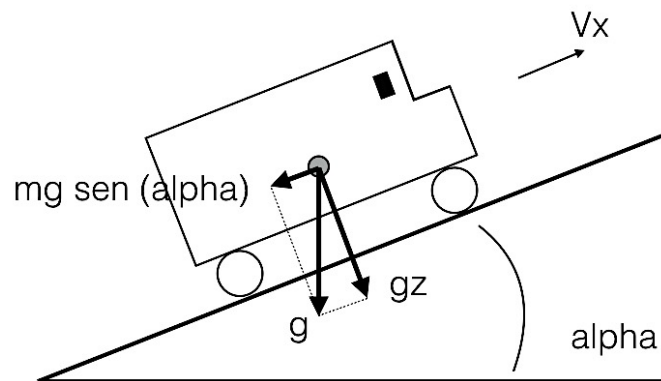


Figura 22. Descomposición de fuerzas sobre el centro de gravedad de un vehículo en pendiente

En la figura 22 se puede observar que el valor del acelerómetro se puede escribir como:

$$a_{x,m} = a_x + g \sin \alpha$$

Ec. 22

Donde  $a_{x,m}$  es el valor medido por el acelerómetro,  $a_x$  representa la aceleración longitudinal del vehículo,  $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad y  $\alpha$  es la pendiente de la calzada.

Asumiendo que se circula en línea recta:

$$\dot{v}_x = a_x \quad \text{Ec. 23}$$

Por lo que:

$$\dot{v}_x = a_{x,m} - g \sen \alpha \quad \text{Ec. 24}$$

Para establecer el filtro Kalman es necesario definir  $v_x$  y  $\alpha$  como variables de estado y  $a_{x,m}$  como variable de entrada.

$$\begin{aligned} x &= [x_1 \ x_2]^T = [v_x \ \sen \alpha]^T \\ u &= a_{x,m} \end{aligned} \quad \text{Ec. 25}$$

Se asume la pendiente de la calzada como constante, por lo que la ecuación de estado será:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -g \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad \text{Ec. 26}$$

En este paso, se selecciona como variable de observación la estimación de velocidad longitudinal, realizada previamente.

$$y = \hat{v}_x \quad \text{Ec. 27}$$

Con matriz de observación:

$$C = [1 \ 0] \quad \text{Ec. 28}$$

Y ecuación de observación:

$$\hat{y} = Hx \quad \text{Ec. 29}$$

Ecuación de estado discretizada:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\tau g \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0,981 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 30}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 31}$$

Con esto quedaría completado el filtro Kalman, se sustituyen los parámetros  $C$ ,  $A$  y  $B$  en la ecuación 3 para estimar pendiente de calzada. A partir del valor de la estimación de velocidad, se puede obtener la pendiente:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k|k-1} &= A \hat{x}_{k-1|k-1} + B u_{k-1} \\ P_{k|k-1} &= A \hat{P}_{k-1|k-1} A^T + Q \\ K_k &= P_{k|k-1} C^T (C P_{k|k-1} C^T + R)^{-1} \end{aligned} \quad \text{Ec. 32}$$

$$\begin{aligned}\hat{x}_{k|k} &= \hat{x}_{k|k-1} + K_k(y_k - C \hat{x}_{k|k-1}) \\ P_{k|k} &= (I - K_k C)P_{k|k-1}\end{aligned}$$

Sin embargo, se ha asumido que la pendiente es constante, un fenómeno poco frecuente en realidad. Por ello se propone un factor limitante en la estimación de pendiente. Si la estimación no cumple el siguiente criterio:

$$|\alpha(k) - \alpha(k-1)| \leq \Delta\alpha \quad \text{Ec. 33}$$

Entonces, el resultado de la estimación mantendrá el valor obtenido en la iteración anterior:

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \quad \text{Ec. 34}$$

## 4.1.2 Resultados del modelo inicial

En esta sección se encuentra la información referente a los resultados obtenidos del estimador según el modelo de Yunlong Gao.

Se ha intentado implementar el modelo propuesto por Yunlong Gao, descrito en la sección anterior, para realizar las pruebas. Sin embargo, no ha sido posible llegar a implementar dicho modelo, ya que la información que ofrece en su trabajo no parece estar completa. Al simular este modelo, los resultados no son válidos. Como se puede observar a continuación.

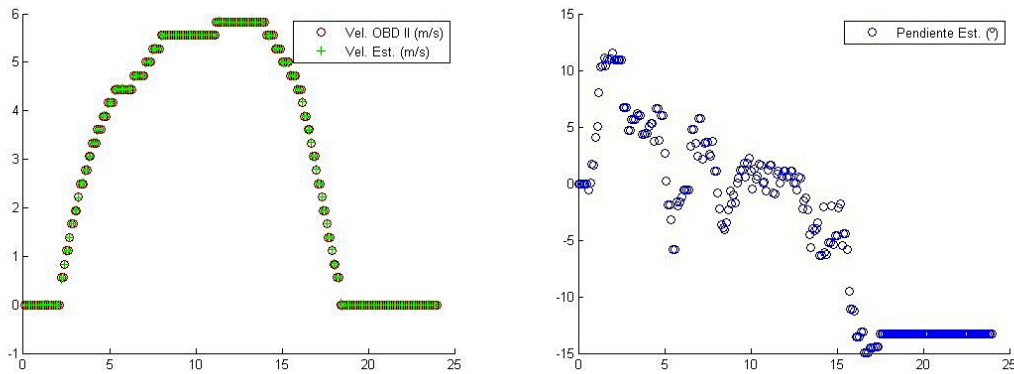


Figura 23. Estimación de velocidad y pendiente en un ensayo en llano según el modelo de Yunlong Gao

En la figura 23 se observan dos gráficas de resultados obtenidos con el modelo de Yunlong Gao. Este ensayo se realiza en llano. La estimación de pendiente es muy precisa, sin embargo, la estimación de pendiente es completamente incorrecta. Se observa cómo predice hasta -15 grados de pendiente en un ensayo en superficie plana. Este

resultado es completamente incorrecto, incluso teniendo en cuenta posibles movimientos de cabeceo del vehículo.

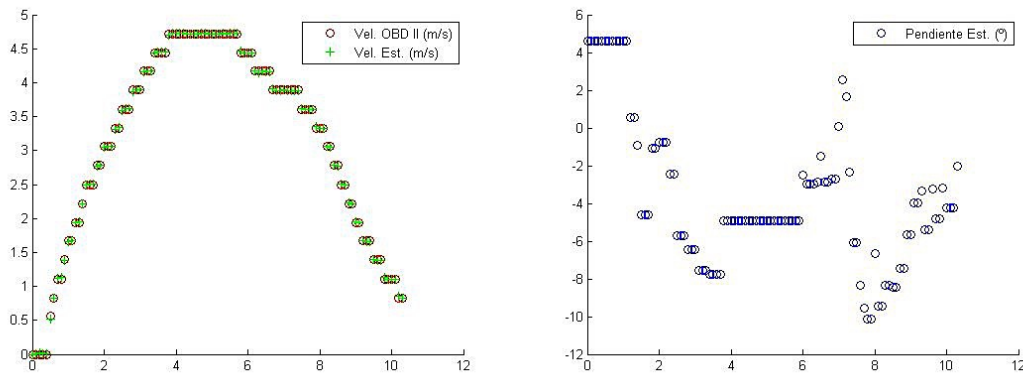


Figura 24. Estimación de velocidad y pendiente en un ensayo en rampa según el modelo de Yunlong Gao

En el ensayo en rampa (figura 24) se puede observar un patrón parecido: la estimación de velocidad es completamente precisa, con un error inapreciable, sin embargo la pendiente es incorrecta, ya que este ensayo se corresponde con una subida a una rampa en la que la pendiente estimada debe ser de 7 grados positivos. En la gráfica no se encuentra un resultado parecido al deseado.

Debido a los errores que han aparecido en los resultados se busca la manera de corregir el modelo. Tras revisar todos los cálculos no se ha podido encontrar la manera de completar el estimador, por lo que los resultados no eran de utilidad.

Existen varios factores que pueden explicar este fenómeno. Por un lado, se ha simplificado el proceso descrito en su trabajo y puede que esto conlleve errores en el cálculo. Por otro lado, es posible que al no poder acceder a la velocidad de rotación de las ruedas del Hyundai de pruebas, el estimador no funcione de la manera deseada.

Para solucionar este problema se ha buscado un modelo alternativo, que pueda satisfacer el marco del experimento.

## 4.2 Estimador final

En esta sección se describe el modelo final empleado para la estimación de resultados. Como se ha descrito en la sección anterior, el modelo inicial no ha resultado útil para la estimación de los parámetros dados. Por ello, es necesario encontrar otro modelo a aplicar.

Como alternativa al modelo propuesto por Yunlong Gao, se ha encontrado el modelo descrito en [1] por Tobias Bonnedahl. Se trata también del estudio de estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada a través de un filtro Kalman, por lo que el



objetivo final coincide. Sin embargo, esta publicación se centra en aplicar un modelo de diseño de camiones. Esta razón hizo que se utilizara previamente el modelo de Yunlong Gao con resultados poco satisfactorios.

Por lo tanto, el modelo de estimador final que se verificará en turismos de tracción delantera es el propuesto por Tobias Bonnedahl en [1]. El modelo completo y sus ecuaciones se encuentran en la siguiente sección.

### 4.2.1 Ecuaciones y modelo finales

Se utiliza un modelo alternativo, propuesto por Tobias Bonnedahl [1], que calcula a la vez velocidad estimada y pendiente. Para explicar cómo realiza la estimación, se muestra por segunda vez la descomposición de componentes de la gravedad y aceleración en un vehículo que circula por una pendiente.

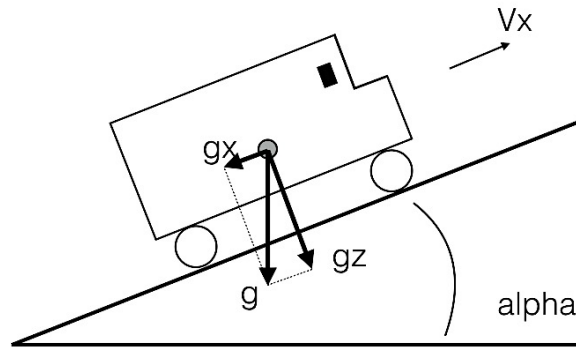


Figura 25. Descomposición de fuerzas en pendiente del modelo final

Como queda reflejado en la imagen, el valor del acelerómetro se puede escribir como:

$$a_{x,m} = a_x + g_x \quad \text{Ec. 35}$$

Donde  $a_{x,m}$  es el valor medido por el acelerómetro,  $a_x$  representa la aceleración longitudinal del vehículo y  $g_x$  es el valor de la componente paralela a la calzada de la gravedad. A su vez,  $g_x$  se puede descomponer como:

$$g_x = g \sin \alpha \quad \text{Ec. 36}$$

Donde  $g$  es el valor de la aceleración de la gravedad y  $\alpha$  es la pendiente de la calzada. El ángulo de pendiente de calzada será por lo tanto:

$$\alpha = \arcsen \frac{g_x}{g} \quad \text{Ec. 37}$$

Asumiendo que se circula en línea recta:

$$\dot{v}_x = a_x \quad \text{Ec. 38}$$

Siendo  $\dot{v}_x$  la derivada en el tiempo del valor velocidad estimado previamente en base a la tasa de muestreo,  $\tau$ . Por lo que:

$$\dot{v}_x = a_{x,m} - g_x \quad \text{Ec. 39}$$

Para escoger el modelo para el filtro, se tienen en cuenta varios parámetros. La aceleración del vehículo,  $\dot{v}_x$  es muy importante, como lo es la variable de velocidad  $v_x$ . Se propuso el valor de pendiente de calzada  $\alpha$  como variable de estado, sin embargo esta idea se desechó, puesto que implicaría el uso de un filtro Kalman extendido. El problema principal es evitar utilizar las funciones seno y coseno dentro del filtro porque su comportamiento es no lineal. Para contrarrestar esto, se utiliza como variable de estado  $g_x$ , siendo posible así utilizar el filtro Kalman típico. De esta manera, se calcula la pendiente fuera del filtro.

En el modelo final, son variables de estado la aceleración del vehículo  $\dot{v}_x$ , la velocidad longitudinal  $v_x$  y la componente longitudinal de la gravedad  $g_x$ . En las ecuaciones 40 y 41 se puede observar el modelo final:

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_k \\ v_k \\ g_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \tau & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_{k-1} \\ v_{k-1} \\ g_x \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau^2/2 & 0 \\ \tau & 0 \\ 0 & \tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{v}_{k-1} \\ w_{k-1} \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 40}$$

$$\begin{pmatrix} v_{k-1} \\ a_{x,m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{v}_{k-1} \\ v_{k-1} \\ g_x \end{pmatrix} + w_k \quad \text{Ec. 41}$$

Las señales de entrada  $\ddot{v}_{k-1}$  y  $w_{k-1}$  se consideran como ruido blanco. Para calcular la derivada en el tiempo de la aceleración  $\dot{v}_k$  se utiliza una aproximación de Euler:

$$\dot{v}_{k-1} = \frac{v_k - v_{k-1}}{\tau} \quad \text{Ec. 42}$$

Para establecer el filtro correctamente hay que tener en cuenta las propiedades del sistema como se ha dicho anteriormente. Se toman los valores de las matrices Q y R propuestos en [1]:

$$Q = \begin{pmatrix} 0,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0,005 & 0 \\ 0 & 0 & 0,003 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 43}$$

$$R = \begin{pmatrix} 0,5 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix} \quad \text{Ec. 44}$$

Estos valores se han comprobado en los ensayos y se admiten como aceptables para el experimento. Al introducir cambios en ellos, algunas estimaciones mejoraban, sin embargo esto no se cumplía para todos los valores ni en todos los ensayos. Se considera un buen compromiso entre versatilidad y precisión. Con esto quedaría configurado el filtro Kalman para estimar la velocidad y la pendiente de calzada de manera simultánea. Los resultados de la implementación de este modelo se pueden encontrar en la sección 4.3 de este capítulo.

## 4.2.2 Simplificaciones del modelo final

Para la realización de este experimento se han asumido varias simplificaciones, con objeto de facilitar su realización. Estas simplificaciones, en general, no suponen una alteración significativa en los resultados de este trabajo de aproximación.

La primera simplificación es la calibración del acelerómetro. Al sustraer el valor registrado por el acelerómetro en parado al resto de medidas, se manipulan en gran medida los datos registrados, aunque de esta manera, se obtienen medidas centradas en torno al valor cero, que facilita los cálculos.

En este proyecto, se asume que el ángulo de cabeceo del vehículo es igual a la pendiente por la que circula. Esto es una simplificación relevante y ciertamente altera el resultado. El cabeceo (pitch) y la inclinación (roll) de un vehículo son factores que influyen en gran medida los registros del acelerómetro, puesto que alteran el plano en el que el acelerómetro opera. Al someterse a una fuerte aceleración, la parte delantera del vehículo se levanta y todo el coche queda inclinado bajo la acción de la aceleración. En este trabajo no se disocia este cabeceo frente a la pendiente, por lo que se considera que el plano sobre el que opera el acelerómetro no varía y se asume una medida horizontal, una vez calibrado. Se propone un estudio de la disociación entre cabeceo y pendiente de calzada como futura línea de desarrollo, en el capítulo 6.

No se tiene en cuenta para la realización del experimento la aceleración vertical que actúa sobre el vehículo en cambios de rasante, ni la aceleración centrípeta que sufre el vehículo en curvas. Esta simplificación no debe alterar los resultados, puesto que en el caso de los cambios de rasante, el acelerómetro registrará una aceleración en el plano vertical (plano z), que no es caso de estudio en este trabajo. En el caso de curvas

horizontales, la medida se registraría en el plano y, que tampoco influye en el cálculo del experimento. Debido a ello, estas situaciones no alteran la medida del acelerómetro en el plano longitudinal (eje x) en el que está recogiendo medidas y, por ende, no influye en la estimación de pendiente resultante.

Los datos de dirección y posición de volante también se desprecia, puesto que influye en el eje transversal del vehículo (y la medida del acelerómetro). Sin embargo, cuando un vehículo circula, la dirección influye en gran medida en el cabeceo y la inclinación del vehículo, por lo que sí es un factor a tener en cuenta para futuros estudios.

Otro factor simplificado en este caso es la utilización de velocidad longitudinal obtenida por el conector OBD II. Este dato interno del vehículo no es del todo preciso. En un caso ideal, se utilizaría la antena GPS incluida en VBOX, pero debido a la pérdida de señal en las pistas de pruebas no se ha podido utilizar. El error de cálculo que se comete aquí es perceptible en los resultados, por lo que también se recomienda un estudio futuro contrastando la velocidad real (GPS) frente a la velocidad medida por el vehículo. De esta manera también se puede calcular de manera más exacta el deslizamiento (slip) longitudinal de los neumáticos, que en este experimento se ha asumido como constante.

## 4.3 Resultados de los ensayos

En esta sección de la memoria se muestran los datos obtenidos durante los ensayos del experimento. En primer lugar, se muestran las medidas de las variables de entrada del ensayo. Para ello, se expone la gráfica del dato de velocidad (obtenido a través de OBD II) y la medida del acelerómetro. Para cada ensayo se indican las condiciones, el sentido, la velocidad máxima y el modo de conducción realizado. Antes de comenzar los registros se ha cerciorado el funcionamiento correcto de la configuración.

A continuación, se observan los resultados obtenidos de la estimación. La estimación produce dos gráficas, una que muestra la velocidad de OBD II (rojo) frente a la velocidad estimada (verde), y otra que muestra la medida de la estimación de pendiente (azul). Estos valores ya están filtrados, reparados, convertidos a Sistema Internacional y calibrados. Se comenta brevemente cada gráfica con los resultados obtenidos.

En primer lugar, se muestran los resultados de las pruebas en llano. Después, se muestran los resultados de las pruebas en superficie inclinada.

### 4.3.1 Ensayos en superficie plana

En esta sección se encuentran los resultados de las pruebas en superficie plana. Se emplea una pista llana (pendiente constante igual a cero). Para garantizar la consistencia de los resultados en llano, se realizan un total de 6 ensayos. Los primeros 3 en un sentido, y los siguientes 3 en el otro sentido. De esta manera, cualquier inclinación de la pista queda reflejada en los resultados y es posible observarlo en los resultados.

#### 4.3.1.1 Ensayo en llano 1

En esta sección se muestran y comentan los resultados del primer ensayo en llano.

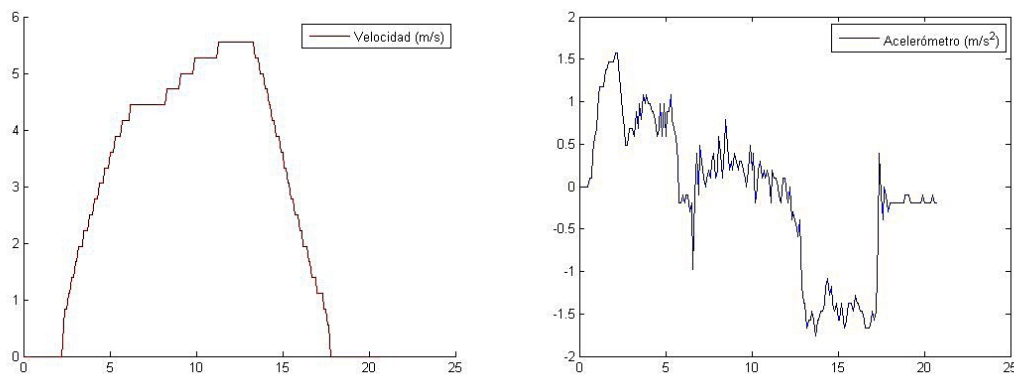


Figura 26. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 1

El primer ensayo en llano, los resultados de las medidas reflejan que se llega a una velocidad máxima de 20 km/h (5,56 m/s). De la medida del acelerómetro se observa que tanto la aceleración como la frenada se aplican de manera relativamente constante, registrando  $1,5 \text{ m/s}^2$  de aceleración en cada caso.

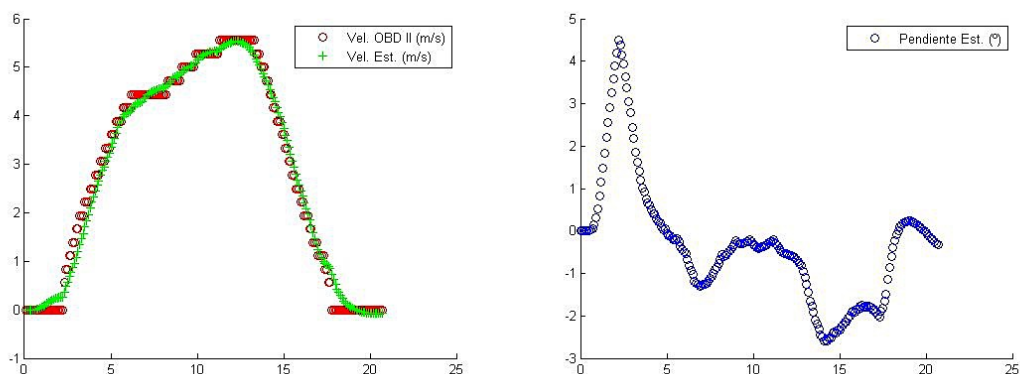


Figura 27. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 1

Se puede observar en las gráficas que la estimación de velocidad sigue con gran precisión la velocidad real. La pendiente indica un pico de 5 grados inicial (probablemente debido al cabeceo por aceleración), para después mantenerse

en torno a 0, -1 grados de inclinación, un resultado que se considera que se corresponde con una superficie plana, dentro de unos márgenes aceptables. El pico negativo final (-2,5 °) se debe a la inclinación del vehículo durante la frenada. Se considera que los resultados obtenidos durante el primer ensayo en llano son válidos.

#### 4.3.1.2 Ensayo en llano 2

En esta sección se muestran y comentan los resultados del segundo ensayo en llano.

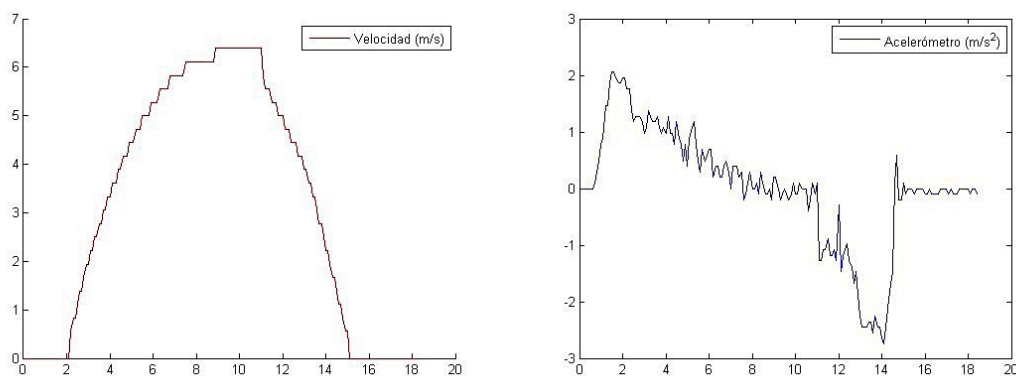


Figura 28. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 2

Durante el segundo ensayo en llano, la velocidad máxima (según las medidas registradas) es de 23 km/h (6,39 m/s). La aceleración muestra un pico de  $2 \text{ m/s}^2$ , un descenso lineal hasta  $0 \text{ m/s}^2$ , momento en el que se inicia un proceso de deceleración sostenido, de hasta  $-3 \text{ m/s}^2$ .

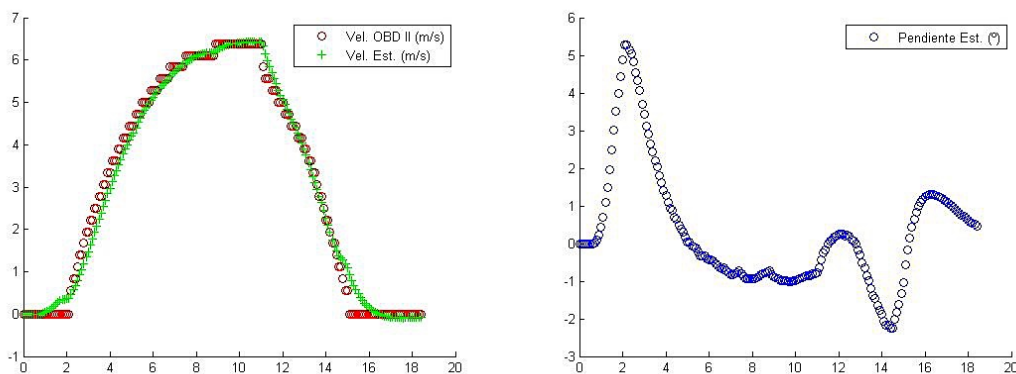


Figura 29. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 2

Al observar los resultados de las estimaciones, varios aspectos saltan a la vista. Por un lado, el resultado de velocidad estimada vuelve a seguir con gran proximidad el dato de velocidad real. Por otro lado, la estimación de pendiente

muestra un pico de 5 grados al inicio del ensayo, después se estabiliza en un rango aceptable como llano ( $-1^\circ$ ,  $1^\circ$ ) y finaliza durante la frenada mostrando una serie de picos ( $-2^\circ$ ,  $1,5^\circ$ ). Estos resultados se corresponden con la realidad debido a los fenómenos de cabeceo del vehículo. Por lo tanto, se consideran como aceptables los resultados del segundo ensayo en llano

### 4.3.1.3 Ensayo en llano 3

En esta sección se muestran y comentan los resultados del tercer ensayo en llano.

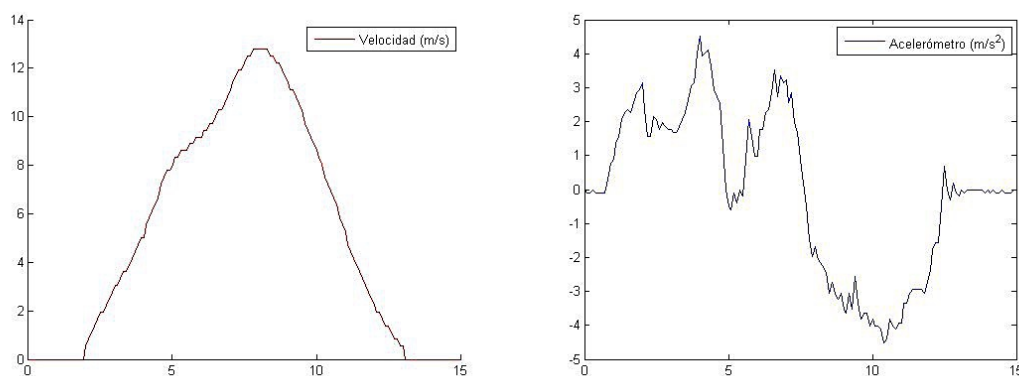


Figura 30. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 3

El tercer ensayo en llano se realiza buscando una mayor velocidad máxima y mayores aceleraciones de arranque y frenada, simulando una conducción más agresiva. En este ensayo se registra una velocidad máxima de 46 km/h (12,78 m/s), duplicando los registros anteriores. Consecuentemente, las aceleraciones registradas son mayores. Se muestran picos absolutos de casi  $5 \text{ m/s}^2$ .

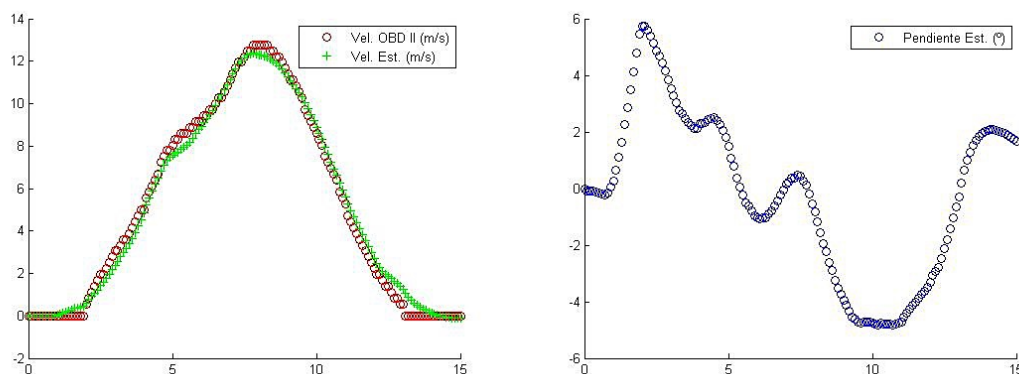


Figura 31. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 3

En los resultados de la estimación de velocidad vuelve a verse una buena aproximación al valor de velocidad real, aunque presenta algunos puntos en los que la estimación podría ser más exacta (en torno a 8 m/s en fase de aceleración,

la estimación se separa ligeramente del valor real). En todo momento, el valor estimado se considera aceptable como dato de velocidad puesto que el error mostrado no es grande. Los resultados de estimación de pendiente muestran mayor actividad registrada que en los anteriores ensayos. Esto es debido al reducido espacio del que dispone la pista de pruebas utilizada, lo que implica tener que acelerar notablemente en arranque y frenada, lo que se traduce en grandes movimientos de cabeceo del vehículo. Así, tras la fase de aceleración (con un pico de 6 grados estimados), el valor se mantiene poco tiempo cerca del valor real de pendiente ( $0^\circ$ ), ya que en cuanto acaba la aceleración se inicia la fase de frenada significativa. Aún así, ambos resultados se consideran válidos, si se tiene en cuenta el fenómeno de cabeceo del vehículo.

#### 4.3.1.4 Ensayo en llano 4

En esta sección se muestran y comentan los resultados del cuarto ensayo en llano. Por primera vez, se realiza este ensayo en el otro sentido de la pista de pruebas.

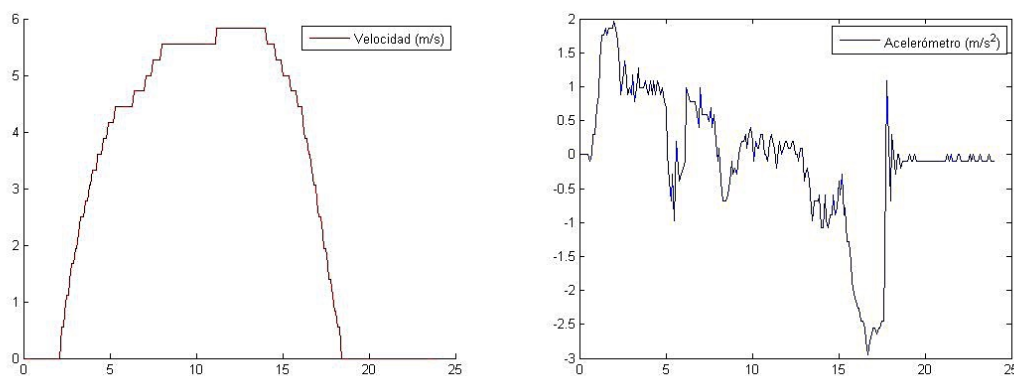


Figura 32. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 4

El cuarto ensayo en llano registra los datos de haber circulado a 21 km/h (5,83 m/s). La aceleración está contenida entre 2 y  $-3 \text{ m/s}^2$ , respectivamente.

La conducción realizada es normal, buscando aceleraciones contenidas, lo cual queda reflejado en la medida del acelerómetro.

Los resultados de la estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada se pueden observar en la figura 33. Se aprecia que una vez más, la velocidad estimada refleja con gran precisión la velocidad real. Por otro lado, los resultados de pendiente de calzada se mantienen en torno a  $-0,5^\circ$ , lo que se considera llano (despreciando los picos durante la aceleración y frenada provocados por el cabeceo del vehículo). Por ello, los resultados de este ensayo, se consideran aceptables.



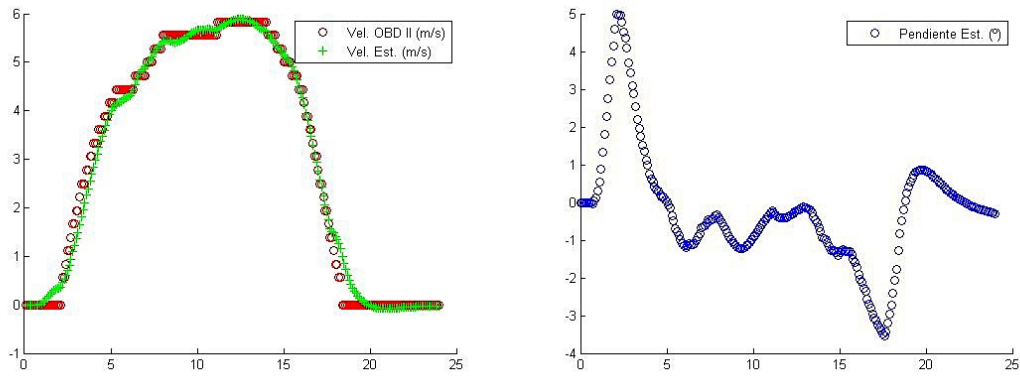


Figura 33. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 4

#### 4.3.1.5 Ensayo en llano 5

En esta sección se muestran y comentan los resultados del quinto ensayo en llano. Se recuerda que este ensayo se hace en el sentido contrario de la pista de pruebas.

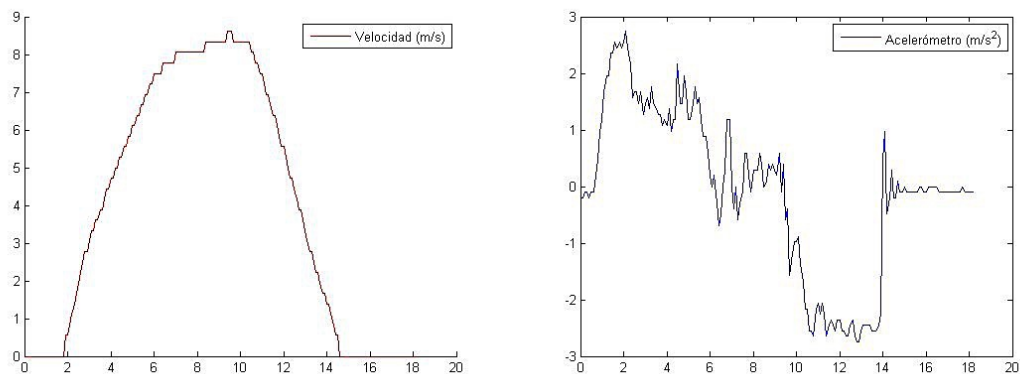


Figura 34. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 5

Durante esta prueba se alcanza una velocidad máxima de 31 km/h (8,61 m/s). El acelerómetro muestra un arranque normal ( $2,5 \text{ m/s}^2$ ), un valor estabilizado en torno a  $0 \text{ m/s}^2$  y una fase de deceleración con  $-2,5 \text{ m/s}^2$  mantenidos.

En cuanto a los resultados de la estimación (visibles en la figura 35), la velocidad estimada, una vez más, predice con buena precisión la velocidad, con valores cercanos a la velocidad real. La estimación de pendiente muestra un pico de  $5^\circ$  inicial (debido a la aceleración), después un valor cercano a  $0^\circ$  (llano), hasta llegar a la fase de frenada (en la que se producen picos de  $-3^\circ$  hasta  $1^\circ$ ). Se comprueba que los resultados cumplen con lo esperado.

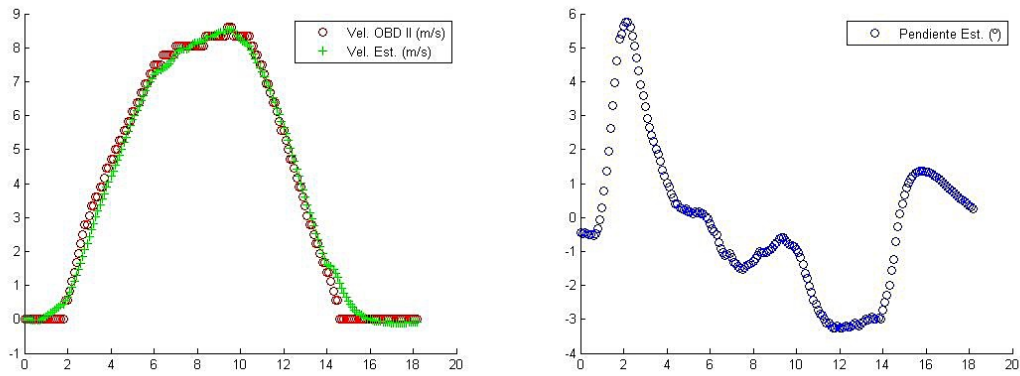


Figura 35. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 5

#### 4.3.1.6 Ensayo en llano 6

En esta sección se muestran y comentan los resultados del sexto ensayo en llano.

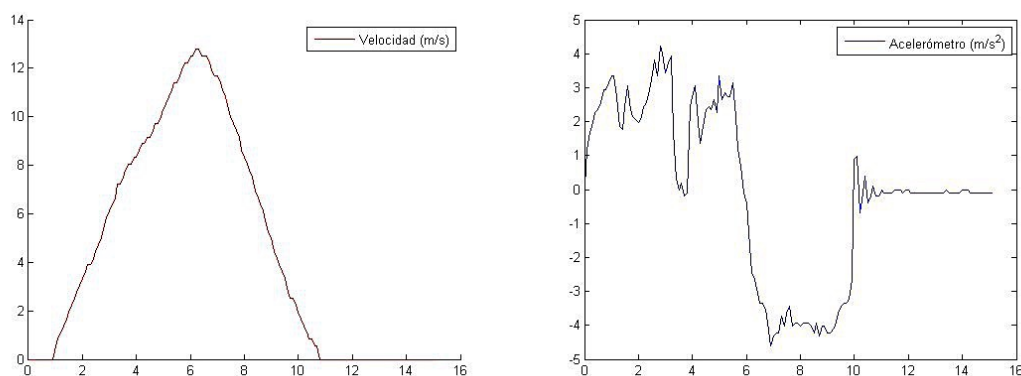


Figura 36. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en llano 6

Para el sexto (y último) ensayo en llano se busca simular por segunda vez una conducción más deportiva. Las mediciones reflejan este comportamiento, registrando una velocidad máxima de 46 km/h (12,78 m/s) y aceleraciones absolutas sostenidas en torno a  $4 \text{ m/s}^2$ .

Este comportamiento también se traduce en un mayor movimiento del vehículo, por lo que la estimación de la pendiente queda influenciada por el cabeceo.

Los resultados de la estimación reflejan estos aspectos de manera clara. La velocidad estimada se parece en gran medida a la velocidad real, y la pendiente estimada, pese a mostrar picos de  $8^\circ$  en aceleración y  $-6^\circ$  en frenada, se mantiene en torno a  $0^\circ$  en las fases ausentes de fuertes aceleraciones.

Según los argumentos expuestos, se consideran los resultados de la estimación en este ensayo como válidos.

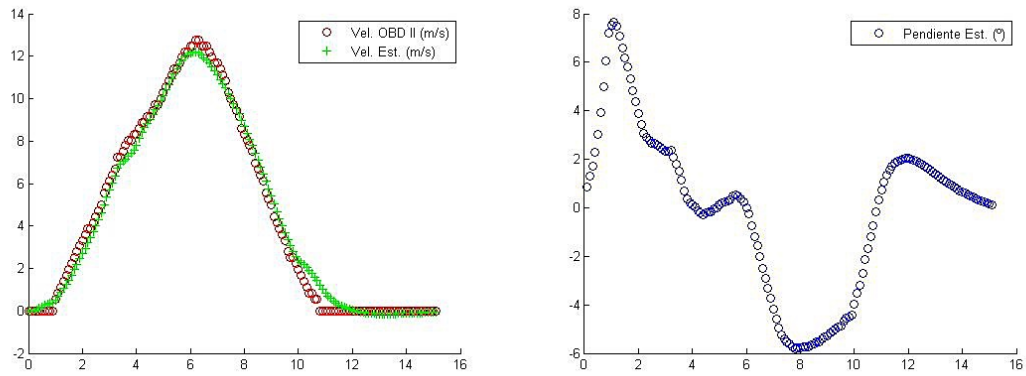


Figura 37. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en llano 6

#### 4.6.1.7 Resumen de los ensayos en llano

En este apartado se comentan brevemente los resultados en común de las pruebas en superficie plana.

El filtro diseñado es capaz de estimar la velocidad longitudinal con gran precisión en condiciones de adherencia y línea recta, con un error pequeño frente a la velocidad real. La estimación de pendiente de calzada es efectiva, aunque el resultado obtenido es la combinación de pendiente incluyendo el cabeceo (pitch) del coche. Además, el error cometido en la estimación parece darse cuando el vehículo se somete a cambios de velocidad repentinos. Aún así, los resultados cumple con lo esperado. Debido a esto, el estimador se considera efectivo en superficies planas.

Más adelante se comprueba la efectividad del estimador en condiciones de superficie inclinada, donde el resultado buscado es obtener con la misma precisión la estimación de velocidad, aparte de estimar un valor de pendiente de calzada distinto a cero.

## 4.6.2 Ensayos en plano inclinado

Esta sección expone los resultados de las pruebas en superficie inclinada. La pista empleada provee un plano inclinado de 7 grados constantes, divididos en dos tramos rectos divididos por una curva en la mitad de la pista, según se ha explicado anteriormente.

La pista inclinada ofrece dos valores distintos de resultado deseable, según el sentido en el que se circule por la pista. Al subir por la rampa, se busca obtener un resultado en torno a 7°. En cambio, durante la bajada, el valor idóneo a registrar es de -7°.

Se realiza un total de 6 ensayos en esta pista. Las primeras tres pruebas se realizan subiendo la rampa. Las siguientes (4-6) registran la bajada de la rampa. La razón de repetir los ensayos aumenta la consistencia de los datos obtenidos y reduce la probabilidad de utilizar datos incorrectos.

La rampa utilizada es relativamente estrecha y corta. Debido a la breve distancia que permite recorrer en la rampa, los ensayos se comienzan y acaban en superficie llana, inmediatamente antes y después de que comience la rampa, respectivamente. Por seguridad, las velocidades máximas en estos ensayos son menores que en llano.

### 4.3.2.1 Ensayo en rampa 1

Se exponen y comentan los resultados obtenidos durante el primer ensayo en rampa. Este ensayo es de subida a la rampa.

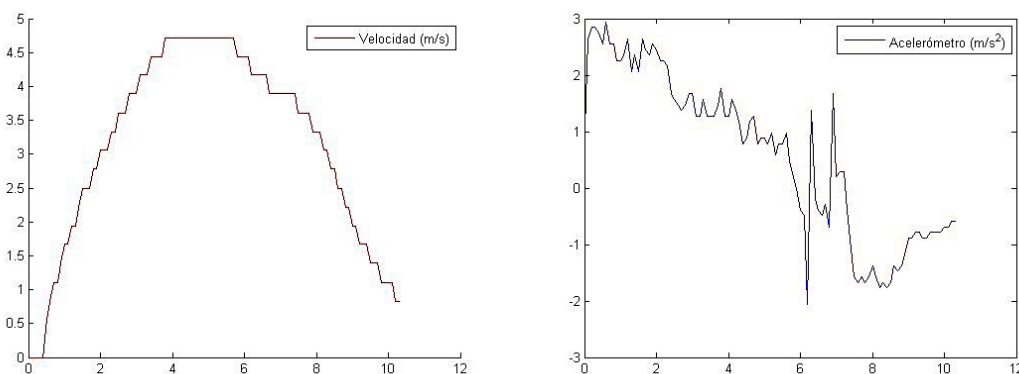


Figura 38. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 1 (subida)

Las gráficas de velocidad y acelerómetro revelan un descenso de la velocidad, como se ha comentado antes. Se miden 17 km/h (4,72 m/s) como velocidad máxima. La medida del acelerómetro muestra claramente un cambio frente a las gráficas en llano. Se observa el pico inicial, provocado por la aceleración del vehículo, pero después los datos se mantienen más tiempo en calores positivos. La serie de picos registrados después se debe a la fase de frenada.

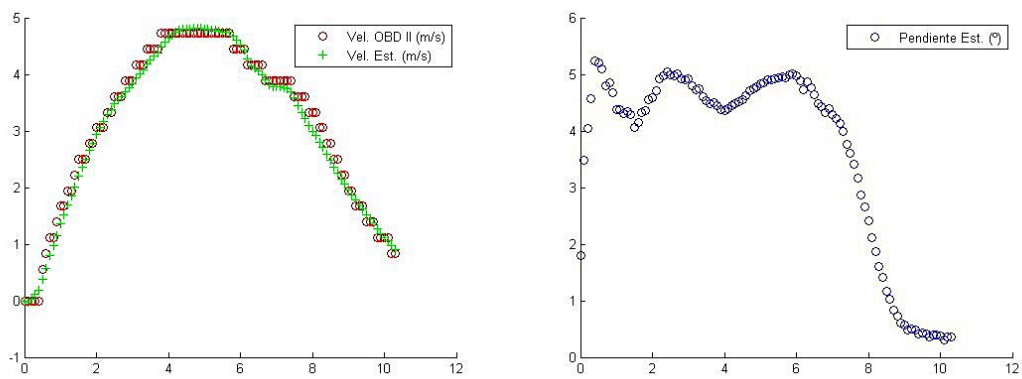


Figura 39. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 1 (subida)

En cuanto a los resultados de las estimaciones, la velocidad estimada parece seguir con igual precisión la velocidad real que en llano. Sin embargo, la estimación de pendiente muestra un valor constante de pendiente de 4,5-5 grados y para en llano, lo que se corresponde con la realidad. Se asume la variación de 2 grados de diferencia frente a la pendiente real como influencia del cabeceo del vehículo. Los resultados de este ensayos se consideran válidos.

#### 4.3.2.2 Ensayo en rampa 2

A continuación se muestran los resultados del segundo ensayo en rampa de subida. Se incluye un breve comentario de los registros.

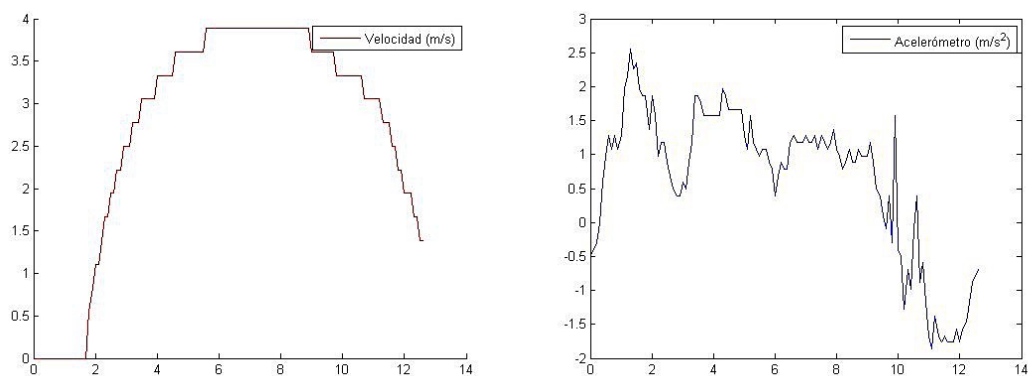


Figura 40. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 2 (subida)

La velocidad máxima registrada en este ensayo es de 14 km/h (3,89 m/s). Las aceleraciones medidas por el acelerómetro también son menores, aunque se refleja el mismo patrón que en el ensayo en rampa anterior: tras el pico inicial de aceleración del vehículo, el valor permanece en valores positivos hasta que el vehículo entra en fase de frenada. Esto se corresponde con lo deseado, puesto que el valor de aceleración longitudinal aumenta al subir un plano inclinado.

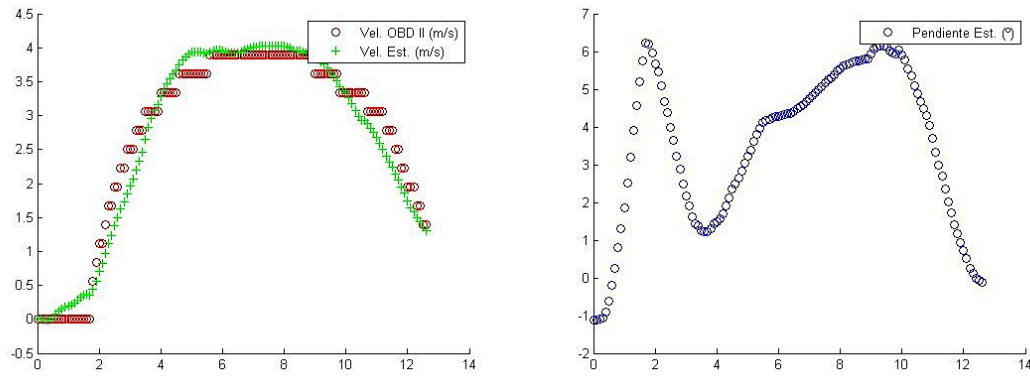


Figura 41. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 2 (subida)

Los resultados de la estimación muestran lo siguiente: la velocidad estimada sigue la velocidad real, aunque con menor precisión que en otros ensayos. Esto puede deberse a la brevedad de la pista y la falta de velocidad suficiente. Sin embargo, el resultado sigue siendo satisfactorio. Por otro lado, la estimación de pendiente vuelve a cumplir con lo esperado: tras el pico de aceleración, la pendiente estimada crece hasta indicar una pendiente de 6,5°, un valor altamente preciso. El aumento de precisión en la estimación de pendiente puede deberse a la menor velocidad de subida y la ausencia de grandes cambios en velocidad, lo que se traduce en un menor movimiento de cabeceo. El resultado de este ensayo es satisfactorio.

#### 4.3.2.3 Ensayo en rampa 3

Esta sección de la memoria resume los datos registrados y los comentarios añadidos al tercer ensayo subiendo la rampa de la pista de pruebas.

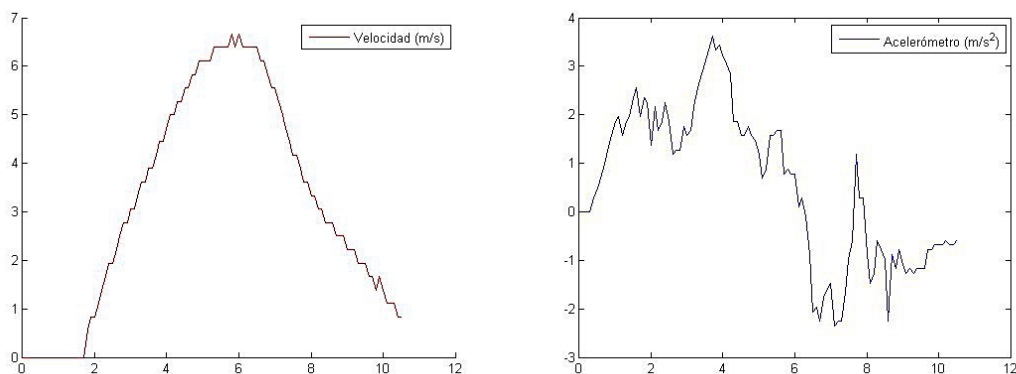


Figura 42. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 3 (subida)

Durante el último ensayo de subida en rampa, se intenta alcanzar una mayor velocidad. El registro muestra 24 km/h (6,67 m/s) de máxima. El incremento de velocidad también se ve reflejado en las aceleraciones medidas, con un rango de datos mayor (3,5, -2,5  $m/s^2$ ).

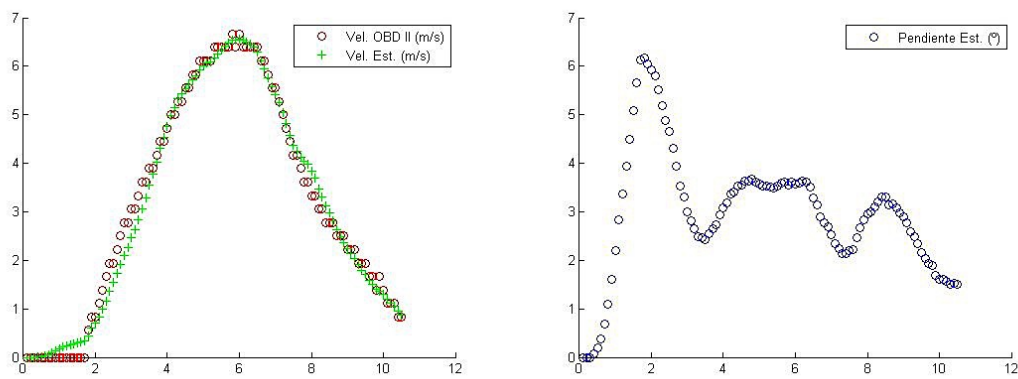


Figura 43. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 3 (subida)

Los resultados de la estimación de velocidad muestran gran precisión, con error mínimo. La pendiente estimada por su lado, vuelve a indicar un valor estimado en torno a 3,5° de pendiente. Esto se debe a la presencia de un mayor cabeceo inducido por mayor variación de velocidad durante la prueba. Parece ser que la estimación es más exacta en condiciones de conducción más sosegadas, puesto que el cabeceo es menor en estas circunstancias. Con todo ello, el resultado obtenido en este ensayo se considera apto.

#### 4.3.2.4 Ensayo en rampa 4

Se comentan en esta sección los resultados registrados durante el cuarto ensayo en rampa. Este ensayo supone la primera prueba de bajada por la rampa.

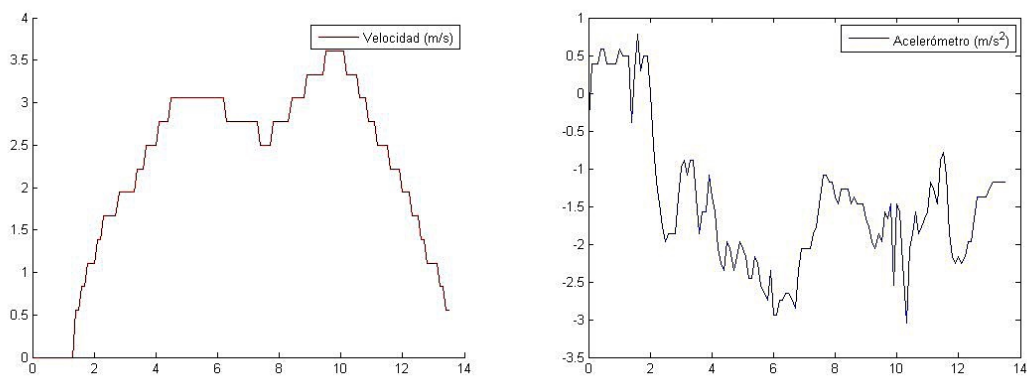


Figura 44. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 4 (bajada)

Este ensayo considera la bajada por un plano inclinado. Al bajar por la rampa, la velocidad alcanzada es menor, para garantizar la seguridad. El dato máximo de velocidad en el registro es de 13 km/h (3,61 m/s). Se observa también que la velocidad fue mantenida en este ensayo, lo que se debe a la utilización de los frenos durante la bajada.

El registro del acelerómetro muestra un patrón nuevo, que se corresponde con la condición de bajada por la rampa: el pico de aceleración inicial es mínimo y enseguida pasa a indicar un valor claramente negativo durante el resto de la prueba.

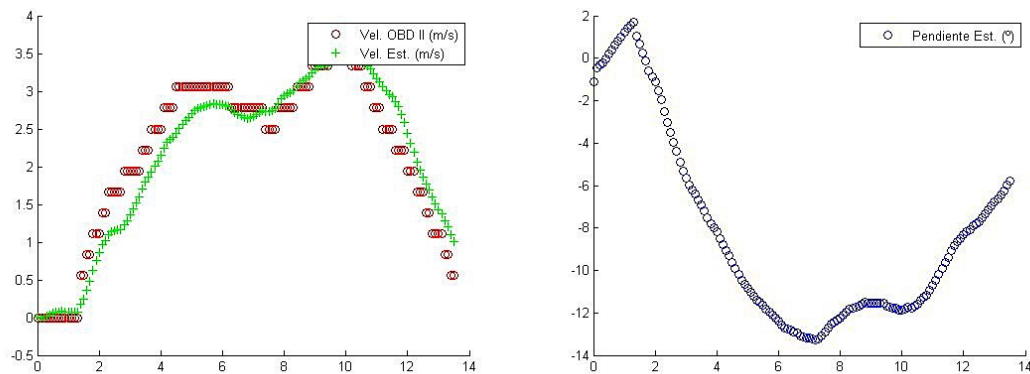


Figura 45. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 4 (bajada)

Como se puede observar en las gráficas de los resultados de la estimación, la velocidad estimada comete un mayor error. Se encuentra que a menores velocidades la estimación de velocidad es menos precisa.

La estimación de pendiente, sin embargo, indica claramente una pendiente negativa. Los valores se quedan en torno a  $-12^\circ$ . La diferencia frente a los  $-7^\circ$  reales de la pendiente se relaciona con el cabeceo inducido al vehículo por pisar los frenos de manera mantenida durante el descenso de una rampa.

Con todo ello, los resultados del cuarto ensayo en rampa se consideran útiles y válidos.

#### 4.3.2.5 Ensayo en rampa 5

Se muestran y comentan a continuación los resultados obtenidos durante el quinto ensayo en rampa. Esta prueba se realiza en bajada por la rampa.

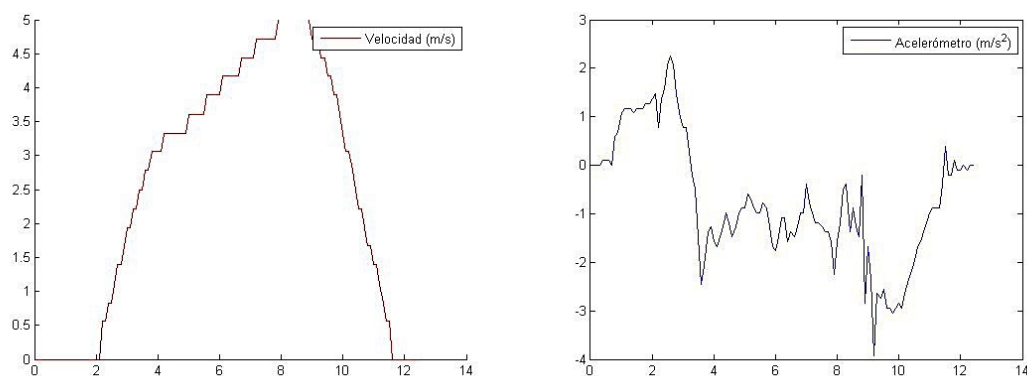


Figura 46. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 5 (bajada)



La velocidad registrada en este ensayo es mayor, de 19 km/h (5,28 m/s). La gráfica del acelerómetro muestra de manera clara, una vez más, que se trata de una pendiente en bajada, al igual que en el ensayo anterior. Se considera que las medidas tomadas en este ensayo son correctas y se corresponden con el caso dado.

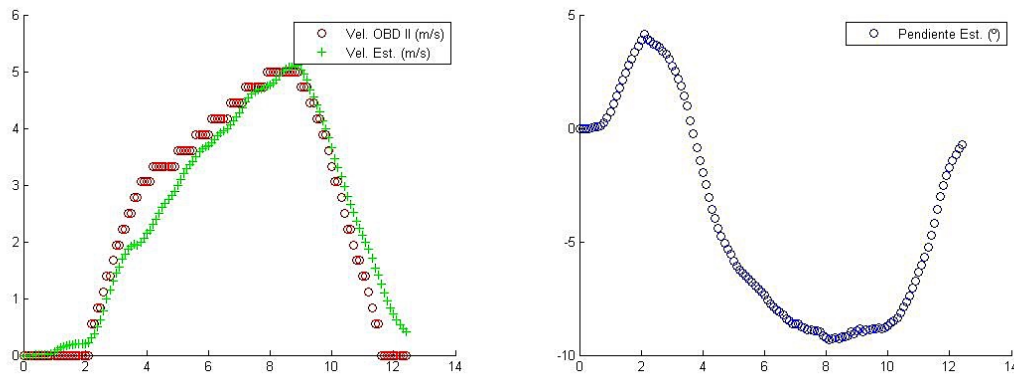


Figura 47. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 5 (bajada)

En cuanto a las estimaciones (figura47), se observa, por segunda vez, que la estimación de velocidad es menos precisa a velocidades menores. Pese a ello, el resultado se sigue considerando aceptable.

Asimismo, la pendiente estimada devuelve un valor correcto, de  $-9^\circ$  de pendiente. Al igual que en el ensayo anterior, la diferencia con la pendiente real ( $-7^\circ$ ) se asume por fenómenos de cabeceo. Los resultados de este ensayo son satisfactorios.

#### 4.3.2.6 Ensayo en rampa 6

En esta sección se muestran y comentan los resultados del sexto ensayo en rampa. Es el último ensayo en bajada por la rampa.

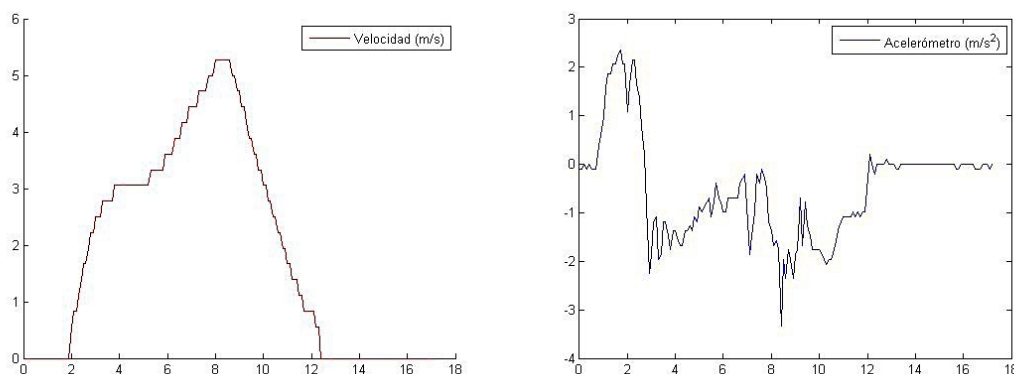


Figura 48. Medidas de velocidad y acelerómetro en el ensayo en rampa 6 (bajada)

En este ensayo de bajada, se alcanza una velocidad de 19 km/h (5,27 m/s). La gráfica sigue el patrón de los últimos ensayos, con un breve pico de  $2 \text{ m/s}^2$  para pasar a indicar un valor casi constante de  $-2 \text{ m/s}^2$ .

Los resultados de la estimación (visibles en la figura 49) muestran el perfil visto en los ensayos de bajada anteriores. La estimación de velocidad comete un error visible en el momento de aceleración, entre 1,5 y 3 m/s no muestra la velocidad real. A partir de ahí, sin embargo, la precisión de la estimación es elevada.

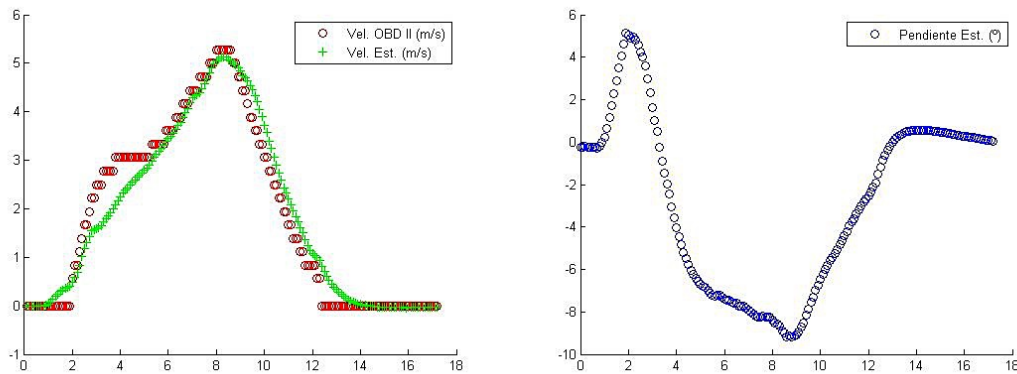


Figura 49. Estimación de velocidad y pendiente en el ensayo en rampa 6 (bajada)

En cuanto a la estimación de pendiente de calzada, se observa el pico de aceleración, en el que se estiman  $5^\circ$  aproximadamente (probablemente debido al cabeceo por aceleración) y después la gráfica pasa a indicar una pendiente de hasta  $-9^\circ$ . Como se ha mencionado con anterioridad, este valor es aceptable, asumiendo los  $2^\circ$  de diferencia frente a los  $-7^\circ$  de la pendiente dados a efectos de cabeceo del vehículo. Este ensayo puede considerarse útil.

#### 4.3.2.7 Resumen de los ensayos en rampa

En este apartado se comentan brevemente los resultados en común de las pruebas en superficie inclinada.

El filtro diseñado demuestra ser capaz de estimar la velocidad longitudinal con notable precisión en planos inclinados, mientras se cumpla la condición de adherencia. Existen pequeños errores de estimación frente a la velocidad real, la precisión aún así es elevada. Este error en la estimación parece haberse dado más frecuentemente en condiciones de baja velocidad.

Por otro lado, la estimación de pendiente se ha mostrado claramente útil, mostrando gráficas completamente distintas en las diferentes pruebas de subida y bajada. Al igual que en llano, se sigue obteniendo la suma de pendiente de calzada más cabeceo, aunque se puede observar con claridad que la estimación es satisfactoria en relación con la pendiente real por la que circula el vehículo. El modelo diseñado y su implementación, se consideran efectivas para estimar velocidad longitudinal y pendiente de calzada en condiciones de plano inclinado, en base a los resultados.

## Capítulo 5

# DISCUSIÓN

# Índice Capítulo 5

## Discusión

5. Discusión	93
5.1 Limitaciones de los resultados	94
5.1.1 Limitaciones por definición del experimento	95
5.1.2 Limitaciones por contexto	95
5.2 Generalización de los resultados	96

## 5 Discusión

En este capítulo se discuten los resultados obtenidos. Se plantean las limitaciones de los resultados y se generalizan para su aplicación.

El objetivo principal de este trabajo es proponer un método de estimación de velocidad longitudinal a través de un filtro Kalman y después verificar que funciona en vehículos de tracción delantera mientras se cumpla la condición de adherencia.

Los resultados reflejan que, mientras se cumplen las condiciones de adherencia, el estimador es capaz de estimar la velocidad longitudinal con gran precisión en la mayoría de casos. Solamente se ha cometido un error de precisión en la estimación a velocidades bajas (5-10 km/h), aunque no supone un error grande comparado con la velocidad real. En este aspecto, se considera que la estimación de velocidad es precisa y efectiva.

Los resultados de la estimación de pendiente de calzada también ofrecen una visión clara sobre la eficacia del estimador. Los resultados han sido consistentes en todos los ensayos, ofreciendo siempre datos realistas. El modelo empleado simplifica el cabeceo del vehículo, un aspecto a tener en cuenta, puesto que los resultados han estado influenciados en todo momento por el movimiento de cabeceo del vehículo. Por lo tanto, y como se aprecia en los resultados, la estimación es más precisa cuando hay menos variación de velocidad del vehículo, ya que el cabeceo se presenta como una reacción al cambio de aceleración. Considerando como pendiente la combinación de cabeceo y pendiente real, la estimación es precisa y efectiva.

En base a los resultados, el modelo de estimador propuesto se considera útil, fiable y efectivo. Sin embargo, es necesario delimitar la validez de los resultados. Para ello, se describen dichas limitaciones en la sección 5.1.

### 5.1 Limitaciones de los resultados

En esta sección se explican las limitaciones que tiene el alcance de los resultados del experimento descrito. Es necesario explicar estos límites para entender en qué casos el estudio se puede aplicar y en cuáles no es válido.

Se distinguen dos tipos de limitación: por definición del experimento y por contexto. El primer tipo, explica los límites del experimento por definición. Se describen los aspectos que no se tienen en cuenta por cómo está diseñado el estudio.

Por otro lado, las limitaciones por contexto recogen aquellos factores por los que el experimento se ha tenido que realizar como se ha hecho. Cualquier componente del trabajo externo al diseño que haya influenciado su realización viene descrito en esta sección.

### 5.1.1 Limitaciones por definición del experimento

Las limitaciones del experimento por definición explican el alcance del estudio y delimitan su validez en base a su diseño.

En este experimento se encuentran varias limitaciones del experimento por definición. En primer lugar, el alcance del experimento delimita claramente su validez. Como se ha mencionado antes, se estudia la posibilidad de aplicar un modelo de estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada a través de un filtro Kalman en vehículos de tracción delantera bajo condición de adherencia. Por lo tanto, los resultados dejarán de ser válidos en cuanto se pierde tracción o se aplique a un vehículo con configuración motriz diferente a tracción delantera. Se entiende que el experimento se realiza en el sentido normal de marcha. Los resultados no son válidos circulando marcha atrás.

Otro factor delimitante es la simplificación de considerar un modelo de vehículo exento de cabeceo. En este experimento se ha contado como una unidad la combinación de pendiente de calzada y cabeceo. El estimador funciona de manera satisfactoria teniendo este aspecto en cuenta, pero es necesaria su mención, puesto que está representado en todos los resultados del experimento.

### 5.1.2 Limitaciones por contexto

Las limitaciones del experimento por contexto son los factores externos al diseño del trabajo que han influido en la realización del estudio.

En primer lugar, es necesario recordar que este experimento se ha realizado en un entorno controlado. Se han monitorizado numerosos aspectos del vehículo, la instrumentación, las pistas y las condiciones de los ensayos, por lo que las situaciones sometidas a estudio se consideran como entorno controlado. Esto implica que se ha intentado minimizar la probabilidad de error tanto en la medición como en la estimación de parámetros. En un caso real, pueden darse multitud de casos distintos al estudiado en esta memoria, por lo que no siempre los resultados deben ser iguales.

Por otro lado, se ha realizado el experimento faltando una serie de datos relevantes para el estudio. Se ha tenido que prescindir tanto de las velocidades de rotación de cada rueda como de la inclusión de señal GPS. La velocidad rotacional de las ruedas ofrece un dato importante para la estimación de la velocidad longitudinal. Al no poder acceder a ella a través de OBD II, no se ha podido emplear este dato. A su vez, la señal GPS puede ofrecer con gran precisión la velocidad longitudinal real a la que circula el vehículo. Debido a la falta de señal consistente en las pistas de pruebas, no se ha podido emplear este dato tampoco. Esta señal es interesante para calibrar la velocidad estimada frente a la velocidad longitudinal real. La alternativa que soluciona en parte estos dos inconvenientes pasa por utilizar el dato de velocidad que ofrece el propio vehículo. Este dato se calcula también a partir de la velocidad rotacional de las ruedas pero no es un dato preciso al completo, debido a los microdeslizamientos del neumático.

La utilización de la velocidad longitudinal obtenida a través de OBD II trae consigo la siguiente limitación: falta de precisión. La información que se ofrece en el modelo de vehículo utilizado devuelve un valor de velocidad en km/h y en números enteros. Por lo tanto, se considera que la información de entrada para el estimador es poco precisa, por lo que la estimación también pierde precisión.

Otro aspecto en el que se recoge una falta de precisión en las medidas es durante los ensayos con VBOX. El cable USB del sistema no es capaz de transmitir todos los datos recogidos a suficiente velocidad y actuaba como cuello de botella del sistema, por lo que en ocasiones se han perdido datos y ha aparecido un aviso de “buffer lleno”. Tras modificar la configuración para poder realizar los ensayos, la tasa de muestreo de cada ensayo se vio reducida hasta 10 Hz (0,1 segundos). Este valor de muestreo es notablemente bajo para estudiar un modelo en el que por cada 0,1 segundos los parámetros pueden cambiar radicalmente.

Aún habiendo reducido notablemente la tasa de muestreo, en alguna ocasión el aviso de llenado de buffer volvió a aparecer. Esto supone un inconveniente puesto que el aviso salta cuando se han perdido datos porque el registro es demasiado lento. Este hecho también delimita la validez de los resultados, puesto que en ocasiones se producían errores de timing en los registros, probablemente provocados por el cuello de botella.

Todos los factores enumerados comprometen la validez de la estimación, por lo que es necesario explicarlos.

## 5.2 Generalización de los resultados

En esta sección de la memoria se resume bajo qué condiciones los resultados del experimento son válidos y aplicables.

Como se ha mencionado al inicio de este capítulo, el estimador diseñado es válido para vehículos de tracción delantera bajo condición de adherencia. La validez del modelo para otras configuraciones motrices queda pendiente de estudio así como la inclusión de fenómenos de pérdida de adherencia.

En resumen, el estimador propuesto ofrece resultados satisfactorios teniendo en cuenta las simplificaciones asumidas y las limitaciones descritas en las secciones anteriores.



## Capítulo 6

# CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

# Índice Capítulo 6

## **Conclusiones y futuras líneas de trabajo**

6. Conclusiones y futuras líneas de trabajo	99
6.1 Objetivos conseguidos	99
6.2 Aprendizaje	100
6.3 Futuros trabajos	101
6.4 Conclusiones	103

## 6 Conclusiones y futuras líneas de trabajo

En este capítulo se comentan las conclusiones extraídas de la realización de este proyecto. Se valoran los objetivos cumplidos, el aprendizaje que se ha obtenido y se enumeran una serie de líneas de desarrollo futuro.

Tras el desarrollo de este proyecto, se derivan una serie de conclusiones del mismo, que se comentan a lo largo de las siguientes secciones de este capítulo.

### 6.1 Objetivos conseguidos

En este apartado, se discute la eficacia de los resultados en relación con los objetivos marcados durante el diseño del experimento.

El objetivo principal del proyecto es realizar una estimación precisa y fiable de los parámetros deseados. Tanto en la estimación de velocidad longitudinal como en la estimación de pendiente, se han obtenido resultados satisfactorios en términos de precisión y fiabilidad. Aparte de fiabilidad y precisión, se estipuló la necesidad de obtener resultados eficientes, ausentes de ruido y robustos. El método de cálculo empleado supone una carga baja de trabajo, obteniendo un algoritmo ágil y rápido en realizar la estimación, con estimaciones ausentes de ruido. A su vez, estos valores son consistentes en todos los ensayos, adaptándose a varios escenarios de prueba, signo de su robustez.

A nivel específico, se dividió el trabajo en tres grupos de tareas clave. En primer lugar, se estipuló la familiarización con los elementos necesarios para realizar el experimento. El segundo objetivo específico del trabajo fue obtener una visión clara del estado del vehículo a través del puerto OBD II, para sensorizar correctamente el vehículo. Por último, se consideró como objetivo diseñar un modelo de aplicación para el estimador que cumpliese con las necesidades y fuese capaz de adaptarse al tipo de vehículo de prueba.

En base a los resultados obtenidos, se consideran cumplidos los objetivos tanto a nivel general como específico, puesto que la estimación cumple con los requerimientos impuestos de manera eficaz. Al mismo tiempo, la realización del objetivo general no quedaría completa sin haber cumplido con los objetivos específicos.

## 6.2 Aprendizaje

En este apartado se explica qué conocimientos se han adquirido durante la realización del experimento y qué factores han sido más relevantes para la obtención de resultados.

Se ha demostrado que OBD II es la vía más práctica de acceder las variables del vehículo, tanto por facilidad como por precisión de los datos ofrecidos. El propio vehículo obtiene estas señales para sus sistemas de seguridad, y OBD II permite acceder a dicha información de manera eficaz.

El filtro Kalman ha resultado ser un método de estimación rápido, robusto y eficiente en cálculos. El modelo de diseño propuesto por Yunlong Gao [2], válido para vehículos híbridos/eléctricos en condiciones de baja adherencia, no se ha podido implementar de manera completa, posiblemente por falta de información en la fuente. La alternativa, propuesta en el trabajo de Tobias Bonnedahl [1], diseñada para funcionar correctamente en camiones y vehículos industriales, ha permitido completar el modelo y obtener resultados satisfactorios, por lo que este modelo se considera también apto para turismos de tracción delantera.

Los elementos utilizados para la realización del experimento han resultado ser útiles y cumplir con la función deseada, tanto en el caso de componentes de hardware como de programas de software. El adaptador CAN-USB ha permitido acceder a la información del vehículo sin problemas y el conjunto Racelogic VBox han permitido obtener los datos de medida necesarios para la estimación, siempre con gran precisión y una buena integración con el software propio. Queda pendiente resolver el cuello de botella que ha aparecido durante la realización de algún ensayo, puesto que la velocidad de muestreo se ha visto mermada para contrarrestar el problema de llenado de buffer.

Las simplificaciones del modelo empleado para la estimación han permitido obtener resultados satisfactorios, siempre y cuando se tengan en cuenta. La estimación de pendiente, por lo tanto, calcula el dato combinado entre pendiente de calzada junto con cabeceo del vehículo, pero ofrece un resultado útil y relevante para el estudio de la dinámica del vehículo.

Los ensayos realizados han permitido obtener resultados aceptables en todas las pruebas. Se ha demostrado la utilidad de realizar múltiples ensayos para registrar mayor consistencia en los datos y contrastar su validez. Sin embargo, en algunas estimaciones se han registrado ligeros errores entre la velocidad real y la velocidad estimada. Estos errores se han mostrado más aparentes a bajas velocidades, por lo que puede estar relacionado tanto con la medida de velocidad real (por OBD II) como por la configuración de los parámetros Q y R del filtro Kalman. Para sustraer dichos errores, se recomienda elaborar matrices Q y R propias (en este trabajo se han utilizado las matrices propuestas por Tobias Bonnedahl). A su vez, repetir los ensayos en pistas de pruebas más largas permitiría disminuir los efectos de aceleración y deceleración en gran medida, y con ello, reducir el fenómeno de cabeceo, puesto que el cabeceo influye notablemente en la estimación de pendiente de calzada del algoritmo.

En resumen, se ha adquirido un conocimiento global acerca de todos los aspectos envueltos en la realización de este experimento y su desarrollo.

## 6.3 Futuros trabajos

En esta sección se proponen algunas líneas de desarrollo para trabajos futuros. Este proyecto ha consistido en el estudio de aplicación de un modelo de estimación de velocidad longitudinal y pendiente de calzada empleando un filtro Kalman. A lo largo de los capítulos anteriores se han explicado razonadamente los distintos aspectos que envuelven este experimento. Se ha comentado el problema a resolver, la motivación para realizarlo, el método de trabajo y el modelo utilizado para el diseño. Los resultados han corroborado los argumentos expuestos, al obtenerse estimaciones satisfactorias de los parámetros deseados. Sin embargo, para su realización, se han simplificado varias facetas del experimento. Para profundizar el estudio realizado se proponen algunas ideas para integrar en el experimento en el futuro.

En base al experimento descrito en esta memoria, se propone el desarrollo de un modelo extendido del presentado en este trabajo. Teniendo en cuenta las simplificaciones realizadas, se propone estudiar en el futuro el modelo de este trabajo abarcando también los siguientes parámetros:

- Incluir datos pendientes, tales como velocidad real a través de GPS y las velocidades rotacionales de las ruedas (wheel speeds). Esto permitiría mejorar la precisión del modelo y realizar comparaciones entre los distintos sistemas.
- Integrar en el modelo los movimientos propios del vehículo: cabeceo (pitch) e inclinación (roll). Estos datos influyen en gran medida en las estimaciones al variar continuamente el plano de medida del acelerómetro. El argumento para justificar su integración es que permitiría obtener estimaciones más exactas; obtener una estimación de cabeceo aparte del dato de pendiente de calzada permite estudiar de manera mucho más precisa el estado real del vehículo y las fuerzas que actúan sobre el.
- Implementar una aplicación del filtro Kalman en tiempo real. Para poder aprovechar al máximo la información que brinda la estimación, es necesario utilizar dicha información para ajustar los sistemas de seguridad (ABS, ESP, Control de Tracción) a la situación en la que se encuentra. Esto permitiría, por ejemplo, reducir el riesgo de vuelco. Por otro lado, la implementación en tiempo real podría realizarse a través de una interfaz que muestre los resultados de las estimaciones e información recogida por OBD II al conductor. Para la interfaz se propone el diseño de una app para smartphone, lo que también conlleva a la siguiente línea de desarrollo futuro:
- Emplear los sensores internos de GPS y acelerómetro de un smartphone para primero contrastar los resultados con los obtenidos a través de los componentes propios de VBOX, y después sustituirlos. Emplear un smartphone representa una fracción del coste de emplear los aparatos de

Racelogic, y la gran presencia de smartphones en el mercado permitiría integrar y probar el sistema en un mayor número de vehículos.

- Estudiar un modelo que contempla los efectos de pérdida de adherencia. Para ello sería necesario poder simular una pista de baja adherencia (hielo o nieve). Sin embargo, integrar con éxito este modelo en condiciones de falta de tracción aumentaría notablemente el espectro de validez del experimento. El modelo propuesto por Yunlong Gao [2] contempla estos fenómenos, pero no ha sido posible aplicarlo en este experimento.
- Desarrollar un sistema de cambio automático predictivo “look ahead” [9]. La integración de las estimaciones de velocidad y pendiente y la inclusión de información de mapas GPS permitiría elaborar un algoritmo para cajas de cambios automáticas (y recomendaciones de cambio manual) que predijese con precisión cómo evolucionarán las pendientes que el vehículo tiene por delante. Esto ofrece posibilidad para aumentar notablemente la eficiencia y reducir el consumo de combustible.
- Aplicar y validar el modelo de este trabajo (originalmente ideado para vehículos pesados [1]) en otras configuraciones motrices. En este trabajo se ha comprobado el estudio en vehículos de tracción delantera, lo que supone la mayor parte del parque móvil español [19], pero no supone la totalidad. Es interesante incluir otras configuraciones (tracción trasera, total, motocicletas, etc) para aumentar el espectro de aplicación.

En general, estas líneas de desarrollo propuestas buscan probar el modelo en diferentes condiciones para ampliar el rango en el que los resultados son válidos.

Por otro lado, se propone un trabajo futuro alternativo, que incide sobre la falta de seguridad del puerto OBD II. Los fabricantes suelen dejar abierta el acceso a la información del vehículo a partir de este conector. Sin embargo, la falta de encriptación ofrece la posibilidad de alterar el funcionamiento del vehículo de manera remota [24]. Sería interesante realizar un estudio completo del sistema y proponer una solución a los debilidades que se presentan. Se considera importante el estudio propuesto para evitar un ataque remoto al sistema interno del vehículo, lo que podría resultar altamente peligroso.

## 6.4 Conclusiones

En este proyecto se ha propuesto un algoritmo que cumplía los requerimientos establecidos y emplea métodos simples de cálculo. El algoritmo es capaz de estimar velocidad longitudinal y pendiente de calzada en vehículos de tracción delantera de manera precisa mientras se den condiciones de adherencia.

El algoritmo se ha diseñado buscando un compromiso entre versatilidad y precisión. El modelo final estima correctamente los valores para varias condiciones de estudio, cometiendo un error mínimo y aceptable.

Se ha probado la validez del sistema aplicado a turismos de tracción delantera, lo que supone un hecho relevante por la gran presencia de esta configuración motriz en nuestro mercado.

En resumen, la realización de este proyecto ha resultado gratamente satisfactoria, puesto que se han cumplido los objetivos propuestos, se ha diseñado un modelo de aplicación y método de trabajo y se han solventado algunos problemas que han podido aparecer durante el desarrollo. Además, los resultados de los ensayos prueban que tanto la estimación de velocidad longitudinal como la estimación de pendiente de calzada cumplen con gran precisión con lo esperado en todas las condiciones de ensayo a las que se ha expuesto el vehículo.

## Capítulo 7

# ANEXO: PLAN DE TRABAJO Y PRESUPUESTO



# Índice Capítulo 7

## Anexo: Plan de trabajo y presupuesto

7. Anexo: Plan de trabajo y presupuesto	104
7.1 Plan de trabajo	106
7.2 Presupuesto	112
7.2.1 Costes de hardware	112
7.2.2 Costes de software	114
7.2.3 Costes de mano de obra	114
7.2.4 Costes totales de ejecución material	115
7.2.5 Gastos generales y beneficio industrial	116
7.2.6 Presupuesto de ejecución por contrata	116
7.2.7 Importe total del presupuesto	117

## 7 Anexo: Plan de trabajo y presupuesto

En este capítulo se ha incluido el plan de trabajo, así como el presupuesto económico. Se han adjuntado en este capítulo porque ofrecen información relevante para la memoria y su realización, pero queda separado por temática del resto del experimento y sus conclusiones.

### 7.1 Plan de trabajo

En esta sección se expone en profundidad el plan de trabajo seguido, así como un desglose de tiempos en forma de diagrama de Gantt.

Es interesante incluir algunos detalles más desarrollados del trabajo para comprender las implicaciones que tiene su realización, tanto a nivel de dificultad y esfuerzo como a nivel de tiempo requerido.

La razón de incluir ambas visualizaciones (plan de trabajo completo y diagrama de Gantt) viene dada por la utilidad de cada elemento y sus inherentes inconvenientes. En primer lugar, el plan de trabajo permite obtener un plano esquemático de las tareas a realizar. Así, a primera vista se puede entender qué es necesario hacer en cada punto del trabajo. Sin embargo, pese a ofrecer información valiosa, no revela la dificultad de las tareas ni el tiempo empleado en realizarlas. De ahí la razón de la inclusión del diagrama de Gantt.

El diagrama de Gantt es otra herramienta gráfica de visualización de datos. Su utilidad reside en exponer las distintas actividades desempeñadas en función del tiempo requerido y sus fechas. Es una herramienta muy potente para la realización de proyectos y presupuestos. La desventaja de visualizar las tareas en forma de diagrama de Gantt es que esta herramienta no indica las relaciones existentes entre las tareas realizadas.

El plan de trabajo (mostrado en la figura 50) provee una vista esquemática del proceso de trabajo seguido. Ha de tenerse en cuenta que este plan es válido para ambos tipos de ensayo, tanto en llano como en pendiente, ya que solamente influye en el proceso de recogida de datos para el experimento. Se muestran tareas principales en las que se divide la realización del experimento. Este plan tiene en cuenta el proceso experimental completo, desde la identificación de objetivos hasta llegar a las conclusiones.

En primer lugar, el trabajo a realizar consiste en la identificación de objetivos. A raíz de observar un fenómeno en cuestión, se establece cuál es el problema a resolver. En el caso de este experimento, el problema a solucionar consiste en estimar correctamente la pendiente de calzada para posteriormente profundizar el estudio de dinámica de vehículos. El cabeceo de un vehículo altera notablemente su dinámica, y por ello es importante estudiar este fenómeno.

Para obtener una primera hipótesis razonada para explicar el fenómeno correctamente, se realiza el diseño preliminar del proyecto. Se estiman los factores a tener en cuenta, objetivos generales y alcance del experimento, entre otros. De esta manera, se obtiene una visión más clara de los requerimientos del experimento para obtener una respuesta al problema estudiado. Esta primera fase, incluye una tarea simultánea de investigación previa. Esta tarea consiste en identificar correctamente trabajos publicados anteriormente que tratan el mismo problema. Se estudian los modelos aplicados y el método de análisis, así como los resultados y conclusiones obtenidos. Es importante realizar esta investigación previa para observar los contratiempos que otros investigadores han podido encontrarse, como se han resuelto y en qué medida han llegado a solucionar el problema inicial. En el caso de este trabajo, también se han comparado los modelos aplicados para obtener un modelo a verificar en vehículos de tracción delantera.

El segundo paso del proceso de trabajo de este experimento consiste en un primer acercamiento a los elementos que posibilitan la realización del experimento. La familiarización con los elementos resulta de vital importancia para un correcto aprovechamiento del equipo y la obtención de resultados útiles. Se trata de combinar la parte teórica con la aplicación práctica. En este experimento, implica averiguar el estado de la cuestión de los sistemas y conocer las bases teóricas de las distintas partes que componen el trabajo. Simultáneamente, debe verificarse el conocimiento adquirido aplicándolo al vehículo de prueba. Se realizan varias aproximaciones a los distintos componentes del experimento y se aplican, de manera que al final de esta fase, sea posible leer, registrar y almacenar correctamente los datos requeridos durante los ensayos sobre el vehículo, la fase siguiente.

La fase de ensayos sobre el vehículo se centra en obtener datos por primera vez del vehículo. A partir del puerto OBD II se obtiene acceso a la información interna del vehículo. Es necesario registrar correctamente todos los datos para poder obtener las tramas del automóvil. Se realiza una serie de ensayos sobre el vehículo con objeto de averiguar cómo se accede a la información deseada y dónde está localizada. En un plano más técnico, aquí se realizan los ensayos para identificar posteriormente la información de CAN Bus. Esta fase revela los datos que se pueden acceder y cómo están codificados.

Una vez obtenida una lista de datos que se podrían recoger, se procede a diseñar el estimador del experimento. Como se ha explicado en el capítulo 4, se diseña el algoritmo de manera que se obtenga un compromiso entre velocidad y precisión. Un estimador rápido supone una carga baja de cálculo y permite obtener antes resultados estimados. Sin embargo, la estimación no es muy precisa debido a esta velocidad de cálculo. Si se configura el filtro para obtener máxima precisión, el estimador tardaría demasiado en devolver resultados, lo que no es deseable en este proyecto (la estimación sería en tiempo real, en un caso ideal). En resumen, en esta fase se diseña el estimador con el modelo seleccionado y la configuración deseada.

El siguiente paso en el trabajo es obtener datos que introducir en el estimador. Para ello, se realizan los ensayos necesarios en pista. Se tienen en cuenta las condiciones requeridas para las pistas y se enumeran los distintos ensayos necesarios para probar

tanto la validez del estimador como su versatilidad en distintas situaciones. Al realizar los ensayos, se centra la atención en registrar de manera correcta los datos que posteriormente se introducirán en el algoritmo. Una vez obtenidos y almacenados los datos, se procede a preparar los datos para el estimador. Se sigue el proceso explicado en “Análisis de los datos” (Punto 3.2.6). Este paso es necesario para adaptar el formato de los datos al formato correcto para que el estimador funcione. Por otro lado, en este paso también se identifican y reparan los errores de medición que hayan podido surgir durante los ensayos.

Con los datos almacenados, reparados y formateados, se inicializa en estimador por primera vez, de manera que se obtienen los primeros resultados. Es importante obtener los resultados de todos los registros antes de sacar las conclusiones finales, puesto que el análisis de los resultados requiere una visión crítica y objetiva de los resultados completos. Se estudia lo obtenido en cada ensayo y después se encuentran las similitudes, para entender el comportamiento del estimador en base a los resultados que devuelve.

Las conclusiones del experimento suponen la última fase del plan de trabajo que se contempla en esta memoria. Se trata de extraer el conocimiento adquirido y comentar los resultados en relación con ello.

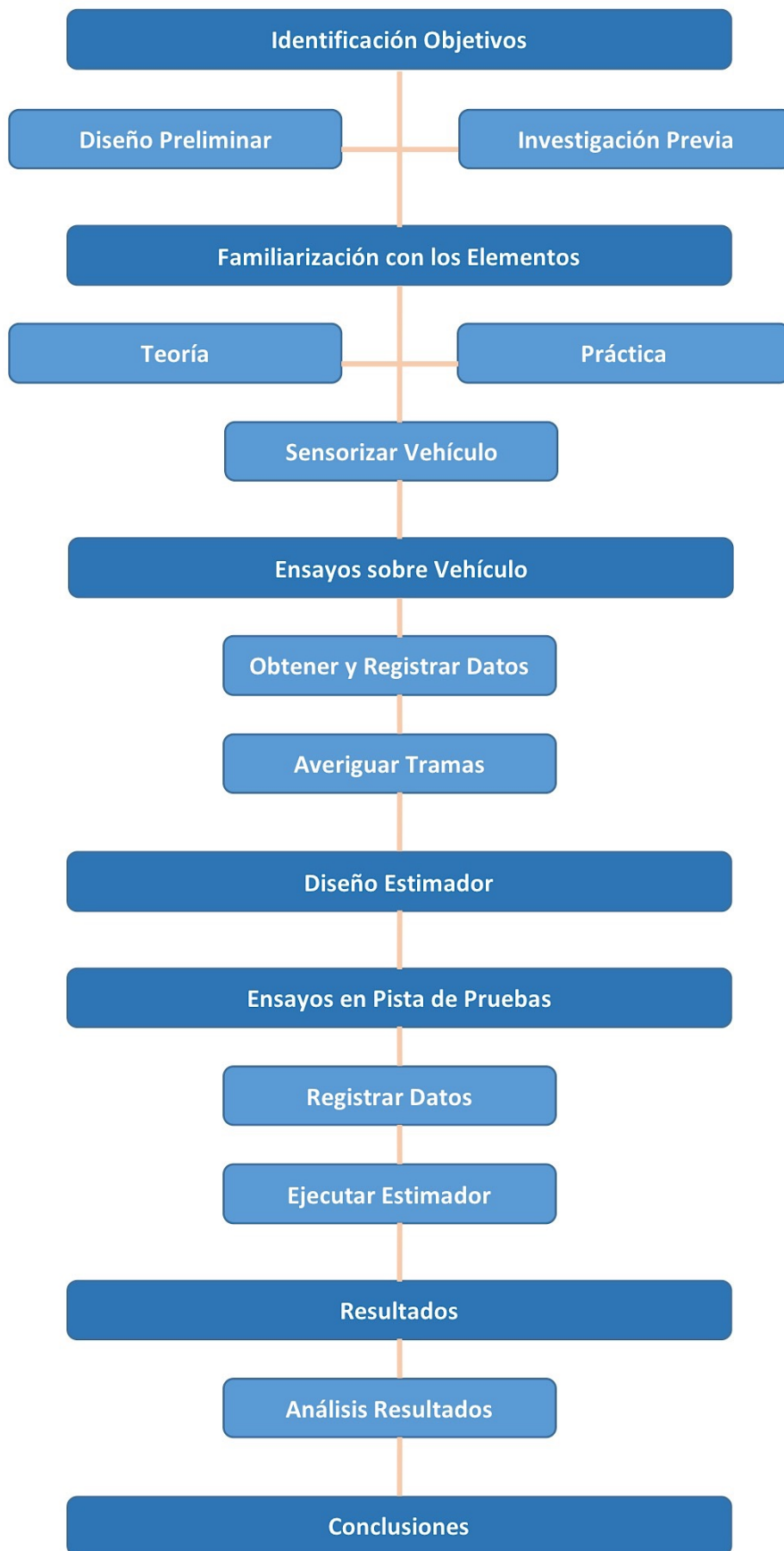


Figura 50. Plan de trabajo

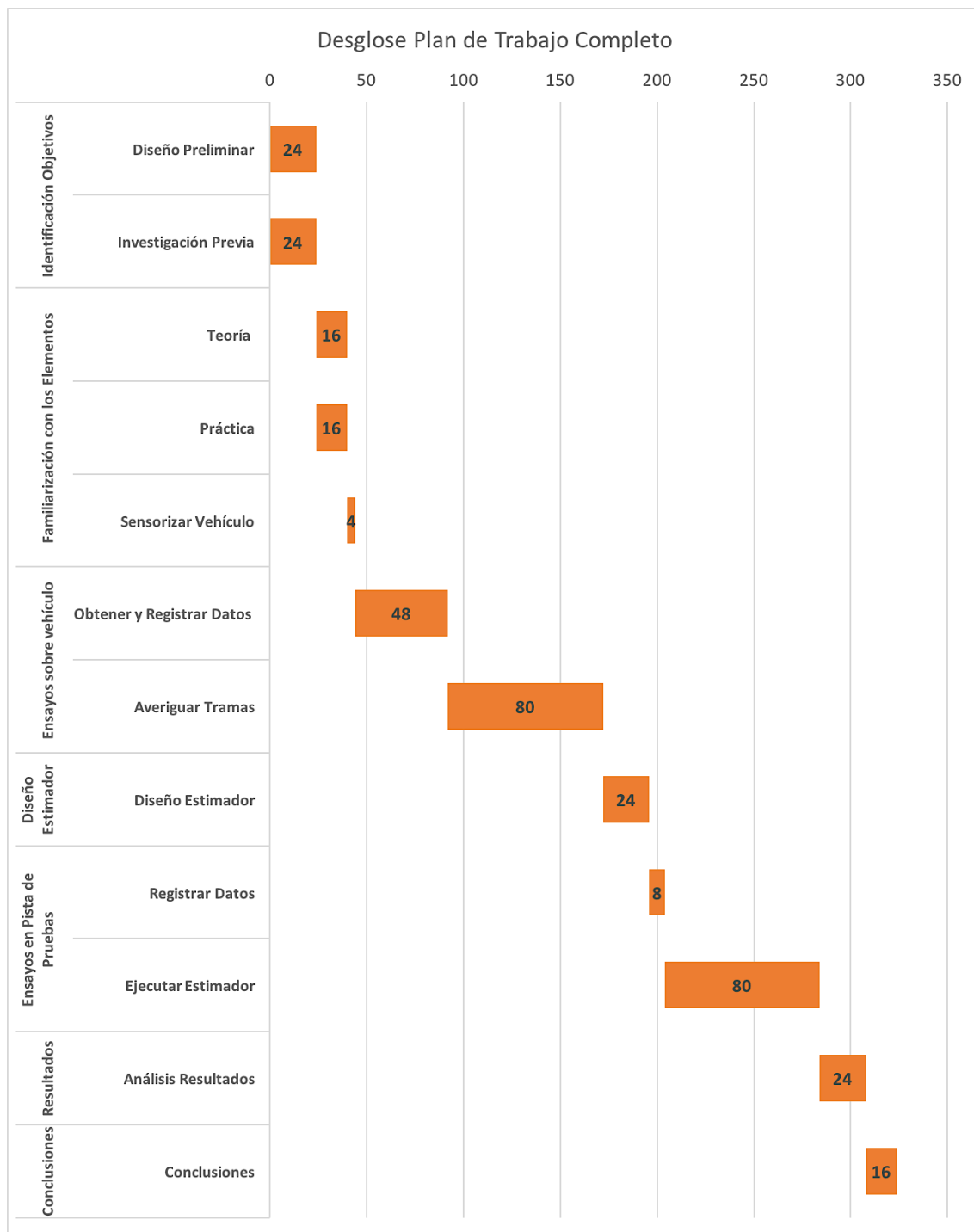


Figura 51. Desglose del plan de trabajo de ingeniería.

Este diagrama de Gantt muestra el desglose del plan de trabajo, medido por horas de trabajo. De esta manera, es posible visualizar en qué tareas se ha invertido más tiempo y esfuerzo, una funcionalidad que no es posible observar en la visión esquemática de la página anterior. De esta manera, es posible identificar las tareas más exigentes del experimento. En este caso, las tareas de averiguar tramas y ejecutar el estimador han supuesto la mayor inversión de tiempo y esfuerzo. En el caso de las tramas, se necesita tiempo para revisar toda la información registrada durante los ensayos del vehículo. Es necesario identificar la localización del dato en cuestión, su codificación, las unidades y

por último verificar lo obtenido. En el caso de ejecutar el estimador, se invierte un tiempo notable en obtener un modelo que funcione correctamente, con todo lo que ello supone: encontrar los datos, abrirlos, leerlos correctamente e iniciar la estimación. A partir de esto, se perfeccionan distintos aspectos de la configuración hasta obtener los resultados más cercanos a lo deseado.

A modo de facilitar la labor de presupuestado del proyecto, se ha incluido el diagrama de Gantt del proceso de ingeniería del experimento reducido (figura 52). Se trata del mismo diagrama de la página anterior, simplificado. En la parte inferior (en azul) se observa un contador total de horas dedicadas a labores de ingeniería del proyecto. Este contador devuelve un total de 324 horas dedicadas al experimento, sin contar el tiempo invertido en mecanografía. Este dato es de gran relevancia de cara a estimar correctamente los parámetros de la siguiente sección: el cálculo del presupuesto.

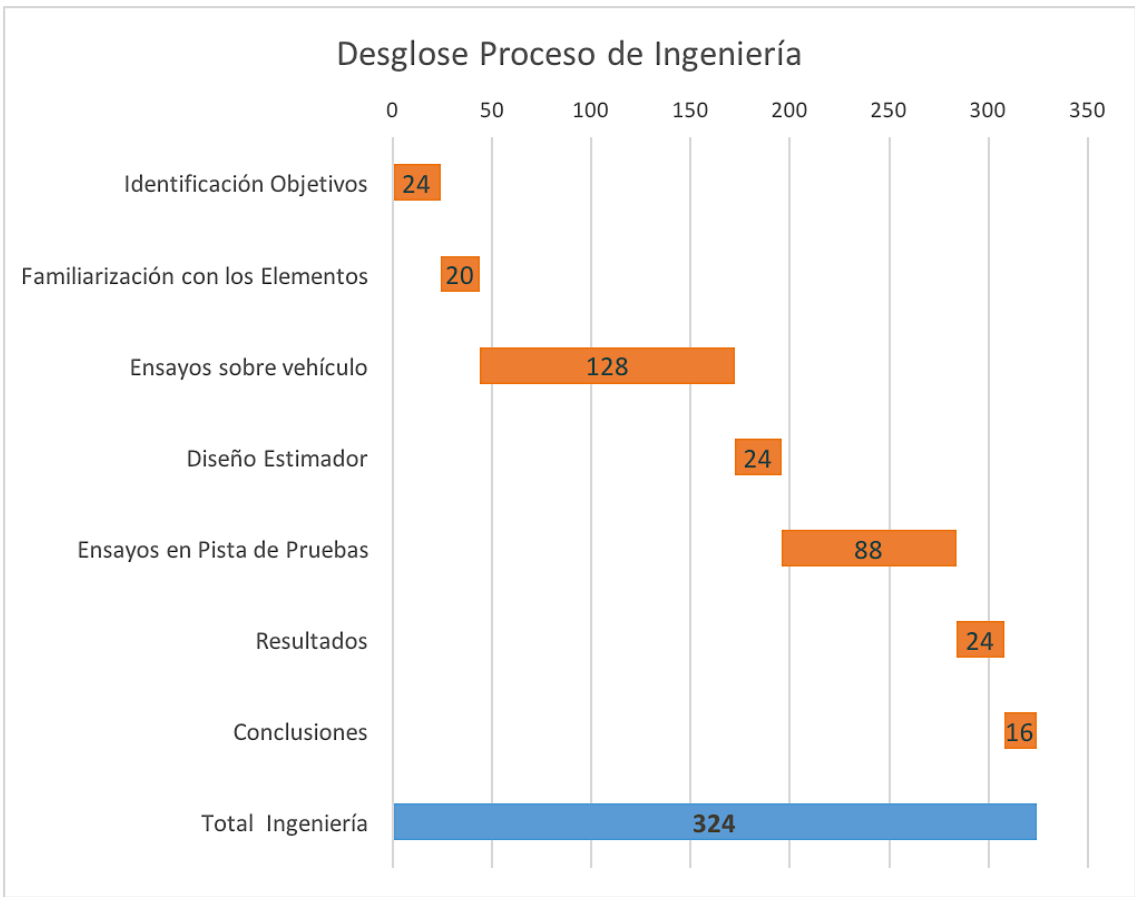


Figura 52. Desglose del proceso de ingeniería simplificado

## 7.2 Presupuesto

En esta sección, se adjunta el desglose de costes estimados para este trabajo, en cuanto a hardware, software y mano de obra. En cuanto a componentes físicos, se ha considerado que para la realización de este proyecto no es necesario adquirir todos los componentes necesarios, puesto que supondría un desembolso cuantioso. Se ha decidido que algunos componentes físicos se pueden alquilar (como el automóvil) o amortizar (como el equipo VBOX), de manera que el presupuesto sea más económico.

### 7.2.1 Costes de hardware

En la siguiente tabla, se muestra la suma de hardware comprado, puesto que era necesario para la realización del experimento o no se podía alquilar como tal.

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Ordenador Portátil Lenovo G70-35 Quad-Core Radeon R5	499 €	1	499 €
Adaptador CAN USB	130,86 €	1	130, 86 €
<b>Subtotal final</b>			<b>629,86 €</b>

Tabla 5. Costes de hardware comprado

Se expone a continuación el listado de hardware alquilado o amortizado. Se ha considerado como tiempo medio de vida útil para los componentes 60 meses (5 años).

Para calcular las amortizaciones, se ha multiplicado el valor de tiempo de utilización de componentes por la amortización media (medida en meses), de manera que:

$$Amortización\ media = \frac{Valor\ de\ Compra\ (€)}{Vida\ útil\ (meses)} \quad Ec. 45$$

$$Amortización = Tiempo\ utilizado\ (meses) * Amortización\ media\left(\frac{€}{mes}\right) \quad Ec. 46$$

La centralita Racelogic VBOX y todos sus componentes tienen un valor de adquisición de 25.000 €. La amortización resultante del VBOX, por tanto, es:



$$\text{Coste amortización VBOX} = 1,5 \text{ meses} * \frac{25.000 \text{ €}}{60 \text{ meses}} \quad \text{Ec. 47}$$

$$\text{Coste amortización VBOX} = 625 \text{ €} \quad \text{Ec. 48}$$

Para calcular el tiempo necesario para el alquiler del vehículo se ha tenido en cuenta el diagrama de Gantt de la sección 7.1 (Figura 51). Se obtiene de esta figura el número total de horas necesarias para el experimento (sin contar mecanografía). Este número asciende a 324 horas de trabajo. Considerando una jornada laboral de 8 horas de trabajo diarias, se obtienen 40,5 días de trabajo (1,35 meses de 30 días). Sin embargo, puesto que la realización de este trabajo es en solitario, se requiere invertir tiempo también en escribir y maquetar la memoria mientras se diseña el experimento. Esto hace que el tiempo necesario de trabajo sobre el coche se redondee a 1,5 meses, o 45 días de alquiler

En la siguiente tabla, se muestra la suma de hardware alquilado. El valor del VBOX se ha podido incluir amortizado y el coste del vehículo se ha tomado directamente como valor de alquilar un coche durante el tiempo necesario.

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Coste amortización VBOX	416,67 €/mes	1,5	625 €
Alquiler Hyundai i30 45 días	868,85 €	1	868,85
<b>Subtotal final</b>			<b>1.493,85 €</b>

Tabla 6. Costes de hardware amortizado o alquilado

Por lo tanto, como se indica en la siguiente tabla, los gastos totales de Hardware suman un total de:

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Ordenador Portátil Lenovo G70-35 Quad-Core Radeon R5	499 €	1	499 €
Adaptador CAN USB	130,86 €	1	130, 86 €
Coste amortización VBOX	416,67 €/mes	1,5	625 €
Alquiler Hyundai i30 6 semanas	868,85 €	1	868,85 €
<b>Subtotal final</b>			<b>2.123,71 €</b>

Tabla 7. Costes de hardware completo

## 7.2.2 Costes de software

A continuación se expone el listado de software empleado y necesario para el experimento. Sin embargo, los programas utilizados no han aumentado el coste de presupuesto por varios factores. Por un lado, algunos programas eran de código libre y no cuesta dinero acceder a ellos, como es el caso de Lawicel. Después, hay programas que vienen incluidos como pack indivisible, como es el caso del software Vbox, o el sistema operativo Windows que viene instalado en el ordenador portátil. Por último, se ha incluido la suite de Microsoft Office, Windows Visual Studio y Matlab. Estos programas ofrecen acceso gratuito como estudiante de la Universidad Carlos III de Madrid, por lo que no ha sido necesario presupuestarlos, aunque para cualquier persona ajena a la universidad sí supondrían un desembolso.

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Sistema Operativo Windows	Incluido con el portátil	1	0 €
Windows Visual Studio	0 €*	1	0 €
Microsoft Office	0 €*	1	0 €
Matlab	0 €*	1	0 €
Lawicel	Open Source	1	0 €
Vbox software	Incluido en Pack	1	0 €
<b>Subtotal final</b>			<b>0 €</b>

Tabla 8. Costes de software. \*: Coste como estudiante de la Universidad Carlos III de Madrid

## 7.2.3 Costes de mano de obra

En este paso, es necesario presupuestar el coste de mano de obra. En el caso de este trabajo, se ha considerado como coste de mano de obra el valor de ingeniería y de mecanografía. Se ha establecido el coste de mano de obra de ingeniería en 25 euros por hora y el coste de mecanografía en 15 euros por hora.

Teniendo en cuenta los valores de horas trabajadas en labor de ingeniería mencionado más arriba (324 horas de trabajo), sólo falta conocer el tiempo necesario para escribir la memoria. Para la labor de mecanografía se han considerado 120 horas de trabajo (o 15 jornadas laborales de 8 horas de trabajo diarias).

Concepto	Precio Unitario	Cantidad	Subtotal
Ingeniería	25,00 €/hora	324	8.100,00 €
Mecanografía	15,00 €/hora	120	1.800,00 €
<b>Subtotal final</b>			<b>9.900,00 €</b>

Tabla 9. Costes de mano de obra

#### 7.2.4 Costes totales de ejecución material

En la siguiente lista se han resumido los costes totales de ejecución material, teniendo en cuenta todos los parámetros comentados anteriormente:

Concepto	Subtotal
Hardware	2.123,71 €
Software	0,00 €
Mano de Obra	9.900,00 €
<b>Subtotal final</b>	<b>12.023,71 €</b>

Tabla 10. Costes totales de ejecución material

#### 7.2.5 Gastos generales y beneficio industrial

Los gastos generales y el beneficio industrial son desembolsos obligatorios que proceden de la utilización de instalaciones de trabajo y los ingresos generados por manufactura.

Los gastos geneales representan el coste generado por el hecho de ejercer la actividad empresarial y que no forma parte de los costes de ejecución. Para este proyecto se han estimado en un 7% del coste por ejecución material, según las condiciones de financiación del proyecto H2020, como se puede observar en la tabla 11.

Concepto	Subtotal
Coste total de ejecución material	12.023,71 €
Gastos generales	7 %
<b>Subtotal final</b>	<b>841,66 €</b>

Tabla 11. Gastos generales del 7% (según condiciones de financiación del proyecto H2020)

Por otro lado, el beneficio industrial representa la retribución positiva del proyecto. Si únicamente se tuvieran en cuenta el presupuesto de ejecución material y los gastos generales, el beneficio económico final del proyecto sería nulo. Como retribución final se considera un 9% del coste de ejecución material (tabla 12).

<b>Concepto</b>	<b>Subtotal</b>
Coste total de ejecución material	12.023,71 €
Beneficio Industrial	9 %
<b>Subtotal final</b>	<b>1.082,13 €</b>

Tabla 12. Beneficio industrial del 9%

Resulta útil obtener el valor combinado de gastos generales y beneficio industrial. Al partir del mismo coste inicial (coste de ejecución material), los gastos generales y beneficio industrial se pueden sumar en porcentaje, por lo que al sumar 7% (gastos generales) y 9% (beneficio industrial) se obtiene un 16% combinado. Este valor queda expuesto en la tabla siguiente (tabla 13):

<b>Concepto</b>	<b>Subtotal</b>
Coste total de ejecución material	12.023,71 €
Porcentaje estimado	16 %
<b>Subtotal final</b>	<b>1.923,79 €</b>

Tabla 13. Gastos generales y beneficio industrial combinados

## 7.2.6 Presupuesto de ejecución por contrata

En este presupuesto se realiza el sumatorio de los resultados de los costes de ejecución material, de los gastos generales y el beneficio industrial:

<b>Concepto</b>	<b>Subtotal</b>
Coste total de ejecución material	12.023,71 €
Gastos generales (7%)	841,66 €
Beneficio industrial (9%)	1.082,13 €
<b>Subtotal final</b>	<b>13.947,50 €</b>

Tabla 14. Presupuesto de ejecución por contrata

### 7.2.7 Importe total del presupuesto

En último término, se calcula el presupuesto final del proyecto a partir de los costes totales de ejecución por contrata más el porcentaje de IVA del 21% aplicado.

<b>Concepto</b>	<b>Subtotal</b>
Coste total de ejecución por contrata	13.947,50 €
IVA aplicado (21%)	2.928,98 %
<b>Total final</b>	<b>16.876,48 €</b>

Tabla 15. Importe total del presupuesto

El importe total del presupuesto asciende a: **Dieciséis mil ochocientos setenta y seis euros con cuarento y ocho céntimos.**

## Capítulo 8

# BIBLIOGRAFÍA

## 8 Bibliografía

---

- [1] Tobias Bonnedahl (2010): *Road slope estimation using a longitudinal accelerometer and Kalman filter*. Lund University, Suecia.
- [2] Yunlong Gao (2013): *Longitudinal velocity and road slope estimation in Hybrid/electric vehicles*. Chalmers University, Suecia.
- [3] Min Goo Lee, Yong Kuk Park, Kyung Kwom Jung, Jun Jae Yoo (2011): *Estimation of fuel consumption using in-vehicle parameters*. U-embedded Convergence Research Center, Korea Electronics Technology Institute.
- [4] Yazid Sebsadji, Sébastien Glaser, Saïd Mammar, Jamil Dakhlallah (2008): *Road Slope and Vehicle Dynamics Estimation*. American Control Conference, Seattle, Washington, EEUU.
- [5] Björn Lundin, Andréas Olsson (2012): *Estimation of vehicle mass using an extended Kalman Filter*. Chalmers University, Suecia.
- [6] Arijit Chowdhury, Tapas Chakravarty, P. Balamuralidhar (2014): *A novel approach to improve vehicle speed estimation using smartphone's INS/GPS sensors*. 8th International Conference on Sensing Technology, Liverpool, Reino Unido.
- [7] Fangjun Jian, Zhiqiang Gao: *An adaptive Nonlinear Filter to vehicle velocity estimation for ABS*. Cleveland State University, EEUU.
- [8] Yunlong Gao, Yuan Feng, Lu Xiong (2013): *Vehicle longitudinal velocity estimation with adaptive Kalman Filter*. SAE-China and FISITA World Automotive Congress, China.
- [9] Ermin Kozica (2005): *Look Ahead Cruise Control: Road Slope estimation and Control Sensitivity*. KTH Signals, Sensors and Systems, Estocolmo, Suecia.
- [10] Erik Jonsson Holm (2011): *Vehicle Mass and Road Grade Estimation using Kalman Filter*. Linköpings Universitet, Linköping, Suecia.
- [11] Melika Amiri, Bijan Moaveni (2012): *Vehicle velocity estimation based on data fusion by Kalman Filtering for ABS*. ICEE (Iranian Conference on Electrical Engineering). Tehran, Irán.
- [12] Ken Johansson (2005): *Road slope estimation with standard truck sensors*. KTH Signals, Sensors and Systems, Estocolmo, Suecia.
- [13] Siva Karthik Kotari (2013): *Smart Drive*. Lulea University of Technology, Suecia.
- [14] Haofu Han, Jiadi Yu, Hongzi Zhu, Yingying Chen, Jie Yang, Yanmin Zhu, Guangtao Xue, Minglu Li: *SenSpeed: Sensing Driving Conditions to Estimate Vehicle Speed in Urban Environments*. Jiao Tong University, Shanghai, China. Stevens Institute of Technology, Hoboken, EEUU. Oakland University, Michigan, EEUU.

- [15] Joaquín García Gómez (2015): *Evaluación del consumo y de las emisiones contaminantes de un vehículo mediante Smartphones*. Universidad Politécnica Superior de Alcalá de Henares, Madrid, España.
- [16] Ángel Martín Velázquez: *Android OBD-II*. Universidad de Valladolid, España.
- [17] Brahim Elfilali (2001): *Utilización del filtro Kalman como estimador de la velocidad en el control vectorial de motores de inducción*. Instituto Politécnico Nacional de México.
- [18] Ali Momeni, Seyed Reza Moasheri, Hossein Chabok, Arman Kheradmand (2015): *Developing a Method with an Experimental Study for Estimating Vehicle Speed and Slip using Kalman Filter and Fuzzy Rules*. World Congress on Engineering, Londres, Reino Unido.
- [19] <http://www.anfac.es/estadisticas.action>
- [20] [http://www.mit.edu/~esontag/FTP\\_DIR/kalman\\_students\\_article\\_2010.pdf](http://www.mit.edu/~esontag/FTP_DIR/kalman_students_article_2010.pdf)
- [21] Steve Corrigan (2002): *Introduction to the Controller Area Network (CAN)*. Texas Instruments, Texas, EEUU.
- [22] <http://www.obdii.com/connector.html>
- [23] F. Gustafsson, L Jung, M Millnert (2001): *Signalbehandlung*. 2ª Edición.
- [24] Dan Klinedinst, Christopher King (2016): *On Board Diagnostics: Risks and Vulnerabilities of the Connected Vehicle*. Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pensilvania, EEUU.
- [25] Thomas D. Gillespie (1992): *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers, Palo Alto, California, EEUU.
- [26] Shannon L. Miller, Brett Youngberg, Alex Millie, Patrick Schweizer, J. Christian Gerdes (2001): *Calculating Longitudinal Wheel Slip and Tire Parameters Using GPS Velocity*. American Control Conference, Arlington, Vancouver, Canada.
- [27] <http://www.driverlesstransportation.com/cyber-security-and-vehicle-communications-7103>
- [28] <https://racelogic.com/index.php/en/>
- [29] Moustaf Doumiati, Ali Charara, Alessandro Victorino, Daniel Lechner (2013): *Vehicle Dynamics Estimation using Kalman Filter*. ISTE Limited, John Wiley and Sons, Inc.
- [30] NHTSA (2006): *The Pneumatic Tire*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, EEUU.